

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE
ET BIOCHIMIE



DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE
FILIERE : SCIENCES ALIMENTAIRES
OPTION : NUTRITION ET SCIENCES
DES ALIMENTS

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: AOUINA Meriem

BOUKHARI Siham

Intitulé

Transformation des produits alimentaires par les
enzymes

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. MEDJEKAL SAMIR

Université de M'sila

Rapporteur

Dr. REGGAMI YACINE

Université de M'sila

Examineur

Mr. GUETOUACHE MOURAD

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2020 / 2021

Remerciements

Je remercie tout d'abord le tout puissant qui, par sa grâce qui m'a permis d'arriver au bout de mes efforts en me donnant la santé, la force, le courage et en me faisant entourer des merveilleuses personnes dont je tiens à remercier.

Mes remerciements s'adressent à mon encadrant de ce Master, l'enseignant Mr. MEDJEKAL docteur à l'université de Mohamed Boudiaf M'sila, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour sa patience, sa disponibilité et ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Son soutien, ses compétences m'ont été d'une aide inestimable.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, pour leur soutien constant et leurs encouragements. Je remercie mes sœurs, mes frères, et toute ma famille pour leurs encouragements.

Enfin, Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à tous mes camarades au Master 2 Nutrition et Sciences des Aliments de la Faculté des sciences de l'Université Mohamed Boudiaf-M'sila, ainsi que tous mes autres camarades de cette Université pour leur présence dans les moments difficiles et les excellents moments que j'ai passés avec eux tout au long de cette année.

"À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude".



Liste des abréviations

AGPI: Acide gras polyinsaturé

A.niger: Aspergillus niger

ATP: Adénosine-triphosphate

AW: Activité de l'eau

CBH: cellobiohydrolases

EC: Enzyme commission

GH13: Glycoside hydrolase family 13

HUT: Unité d'hémoglobine

LOX: Lipoxygénases

MC: Catéchines monomères

MCU: Unité de caillot de lait

PAL: Pectate lyase

PC: Unité protéolytique

PG :Polygalacturonase

PH: Potentiel hydrogène

PME: Pectine méthyle estérase

PMG: Pectine hydrolase

PPO: Polyphénol oxydases

PTE: Pectine trans-éliminase

TGA: Trans-glutaminases

TGASE: Trans-glutaminases

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les six classes de réaction utilisées dans la liste des enzymes.....	5
Tableau 2 : Classification des enzymes	6
Tableau 3 : Sources des principales enzymes et leurs applications	8
Tableau 4 : Stabilité au pH de certaines enzymes	9
Tableau 5 : Sélection d'enzymes utilisées dans l'industrie alimentaires	11
Tableau 6 : Applications industrielles des pectinases	13
Tableau 7 : Principales applications industrielles des protéases	16
Tableau 8 : Aperçu de l'utilisation des enzymes dans les applications alimentaires.	19
Tableau 9 : Enzymes utilisées dans les industries laitières.....	20
Tableau 10 : Principales enzymes protéolytiques utilisées dans la transformation de la viande	21
Tableau 11 : Exemples de quelques enzymes commerciales utilisées dans la transformation de la viande	22
Tableau 12 : Effet général des enzymes dans la panification	26
Tableau 13 : Enzymes de brassage et leurs effets.....	27
Tableau 14 : Principales enzymes utilisées dans la transformation des fruits et légumes.....	28
Tableau 15 : Principales enzymes utilisées dans le traitement des jus de fruits	29

Liste des figures

Fig. 1 : Structure tertiaire d'une protéine	3
Fig. 2 : Mécanisme de catalyse enzymatique	4
Fig. 3 : Répartition et évolution du chiffre d'affaire des enzymes industrielles par secteur ...	10
Fig. 4 : Dégradation de la cellulose par les endo- et exo-cellulases et la cellobiase	12
Fig. 5 : Structure tridimensionnelle de une enzymes alpha-amylase.....	14
Fig. 6 : Enzymes de dégradation de l'amidon.	15
Fig. 7 : Schéma de traitement utilisé pour l'attendrissement de la viande	23
Fig. 8 : Schéma réactionnel de la formation de liaisons peptidiques entre protéines par la transglutaminase	23
Fig. 9 : Réticulation des protéines en gel et en film induite par la transglutaminase	25
Fig. 10 : Influence de l'augmentation des doses de fongique-amylase sur la qualité du pain pané. De gauche à droite: Contrôle, 10 unités / kg de farine, 30 unités / kg de farine, 50 unités / kg de farine, 70 unités / kg de farine	26
Fig. 11 : Structure détaillée d'une paroi cellulaire végétale	33
Fig. 12 : Enzymes ajoutées dans le traitement du jus	35
Fig. 13 : Organigramme général d'extraction de jus.....	37

Résumé

Les enzymes sont des protéines capables de catalyser des réactions chimiques. Les enzymes sont aujourd'hui des outils importants pour fabriquer, stabiliser ou générer les propriétés de nos aliments. La technique enzymatique est un domaine reconnu comme un élément important du développement industriel, que ce soit l'industrie pharmaceutique, chimique ou l'agroalimentaire. Dans l'industrie alimentaire, l'usage des enzymes alimentaires pour améliorer les qualités technofonctionnelles du produit fabriqué, et pour faciliter les opérations de transformation des produits alimentaires de nombreuses filières : sucre, boulangerie, produits laitiers, brasserie, vinification, jus de fruits, transformation des fruits et la production des boissons. Les enzymes utilisées en industrie peuvent être extraites de tissus végétaux ou animaux, ou produites par fermentation par certains microorganismes.

Les mots clés : enzymes, aliment, pain, fromage, viande.

Abstract

Enzymes are proteins capable of catalyzing chemical reactions. Enzymes are nowadays important tools to manufacture, stabilize or generate the properties of our food. Enzyme technology is recognized as an important element of industrial development, whether in the pharmaceutical, chemical or food industry. In the food industry, the use of food enzymes allows to improve the techno-functional qualities of the manufactured product, and to facilitate food processing operations in many industries: sugar, bakery, dairy, brewery, wine making, fruit juice, fruit processing and beverage production. Enzymes used in the industry can be extracted from plant or animal tissues, or produced by fermentation by certain microorganisms.

Keywords : enzyme, food, bread, cheese, meat.

ملخص

الإنزيمات عبارة عن بروتينات قادرة على تحفيز التفاعلات الكيميائية. تعد الإنزيمات اليوم أدوات مهمة لصنع أو تثبيت أو توليد خصائص طعامنا. تعتبر تقنية الإنزيم جزءاً مهماً من التطور الصناعي، سواء في صناعة الأدوية أو الكيماويات أو الأغذية. في صناعة الأغذية، يتيح استخدام الإنزيمات الغذائية لتحسين الصفات الفنية والوظيفية للمنتج المُصنَّع، وتسهيل عمليات تجهيز الأغذية في العديد من الصناعات: السكر، المخازن، منتجات الألبان، التخمير، صناعة النبيذ، عصير الفاكهة و تجهيز الفاكهة وإنتاج المشروبات. يمكن استخلاص الإنزيمات المستخدمة في الصناعة من الأنسجة النباتية أو الحيوانية، أو يتم إنتاجها عن طريق التخمير بواسطة كائنات دقيقة معينة.

الكلمات المفتاحية : الانزيم / الغذاء / الخبز / الجبن / اللحم .

Sommaire

Introduction	1
"CHAPITRE I" Présentation des enzymes	
1.Définition	3
2.Schéma de classification et de numérotation des enzymes	4
3.propriétés des enzymes.....	6
4.Sources des enzymes alimentaires	7
5.Contrôle de l'activité enzymatique dans les aliments.....	8
"CHAPITRE II" Applications industriel	
1.Les enzymes en industrie	10
2.Grandes classes d'enzymes d'intérêt dans la transformation des aliments	11
2.1.Hydrolases et lyases actives sur les composants des parois végétales	11
2.1.1.Cellulases	11
2.1.2.Pectinases	12
2.1.3.Amylases et Pullulanases	13
2.1.4.Hémicellulases	15
2.2. Protéases et Peptidases	15
2.3.Enzymes ayant des propriétés antimicrobiennes.....	17
2.3.1.Lysozyme	17
2.3.2.Peroxydases	17
3.Maîtrise et amélioration des propriétés technologiques	17
3.1.Maîtrise des qualités organoleptiques des aliments	18
4.Principales application des enzymes dans l'industrie agro-alimentaire	18
4.1.Les produits laitiers	20
4.2.Usages dans la transformation des viandes (Les produits carnés)	21
4.2.1.L'utilisation d'enzymes protéolytiques dans les produits carnés	21
4.2.2.L'utilisation de la transglutaminase dans les produits à base de viande.....	23
4.3.Les produits de mer	24
4.3.1.Protéases	24

4.3.2. Lipases.....	24
4.3.3.La transglutaminase (TGase)	24
4.4.Usages dans la fabrication de produits céréales	25
4.4.1.Les enzymes dans la fabrication du pain (la panification) :	25
4.4.2.Malterie et brasserie.....	26
4.5.Usages dans les préparations des fruits et légumes.....	28
4.5.1.Application des enzymes pectinolytique.....	28
4.5.2.L'utilisation d'enzymes dans la fabrication des bonbons et confits.....	29
5.Enzymes et l'additifs alimentaires	30
5.1.Modification des protéines	30
5.2.Les arômes.....	30
6.Les enzymes et médicaments alimentaires.....	30
"CHAPITRE III" les enzymes dans la transformation des boissons	
1.Généralité	32
2. Les boissons non alcoolisées.....	32
2.1. Industrie du jus de fruit	32
2.1.1. Les types des enzymes appliquées	32
2.1.2.Application des enzymes dans la clarification des jus de fruits	36
2.1.3. Production de jus de fruits.....	36
2.2.Autres produits des industries des boissons non alcoolisées.....	38
2.2.1.lait.....	37
2.2.2.Thé.....	38
2.2.3.Café	39
Conclusions générales	40
"Références bibliographiques"	42

Introduction

"Les enzymes" sont des catalyseurs possédant d'excellentes propriétés qui peuvent permettre de réaliser les processus chimiques les plus complexes dans les conditions expérimentales et environnementales les plus bénignes (Simpson *et al.*, 2012). Les principaux acteurs économiques du développement industriel de ces catalyseurs biologiques dans le secteur agro-industriel sont, d'une part, les transformateurs de la production agricole, d'autre part, les concepteurs et réalisateurs de préparations enzymatiques utilisées à l'échelle industrielle (Linden, 1998).

Les enzymes jouent un rôle plus important que par le passé dans l'industries alimentaires, tant dans les produits traditionnels que dans les nouveaux produits (Binod *et al.*, 2019), car le consommateur se préoccupe de la qualité des aliments et de la possibilité de choisir des aliments perçus comme "naturels" (Berry et Paterson, 1990). Les enzymes peuvent améliorer ou modifier les propriétés fonctionnelles et sensorielles des aliments et des composants alimentaires. L'utilisation d'enzymes dans les aliments traditionnels est un processus séculaire. Cependant, avec les progrès de la biotechnologie au fil des années, les enzymes ont joué un rôle majeur dans la transformation et la production des aliments, permettant des avantages dans un large éventail de processus industriels, y compris les modifications de la texture, de la saveur et de l'arôme des aliments (Collados *et al.*, 2020).

Pendant des siècles, les enzymes sont utilisées traditionnellement pour les produits laitiers, la pâtisserie, le brassage et la vinification (Fraatz *et al.*, 2013). "Aujourd'hui" le secteur des industries alimentaires fabrique ses produits grâce aux services rendus par les sociétés des produits alimentaires. Les enzymes en font partie, comme les arômes ou des agents de texture...etc. Les enzymes sont des outils importants pour stabiliser ou générer les propriétés de nos aliments (Spinnler, 2013).

Dans les domaines de la transformation des produits alimentaires, les enzymes sont devenues indispensables, en permettant des gains de qualité des produits, des diminutions de coût énergétique ou une amélioration des cinétiques des procédés (Spinnler, 2013). Les conversions enzymatiques présentent de nombreux avantages, notamment: elles sont essentiellement soit d'ordre "technologique" : accélération ou régularisation de phénomènes enzymatiques, amélioration des qualités techno-fonctionnelles du produit fabriqué, mise au point de produits nouveaux, valorisation de sous-produits, soit d'ordre "économique" : amélioration des conditions de travail ou de la productivité, régularisation des prix sur le marché.

Les gros consommateurs d'enzymes sont l'industrie de transformation des produits agroalimentaires, ce sont les industries de transformation des produits laitiers (fromageries...), des produits carnés, des produits de mer, l'industrie de transformation des produits céréaliers (boulangerie, pâtisserie...), l'industrie de transformation des fruits et légumes (secteurs des boissons, confiserie...)...etc (Linden, 1998). Diverses enzymes utilisées dans la transformation de ces aliments, comme les cellulases, les pectinases, les amylases, les hémicellulases, les protéases, lysozymes...etc sont abordées. Donc, quel est le rôle des enzymes dans la transformation des produits alimentaires ?. Et comment appliquer ces enzymes dans les industries agro-alimentaires pour divers procédés ?. Dans cette recherche nous essaierons de faire un bref résumé sur ces sujets.

"CHAPITRE I"

Présentation des enzymes

1. Définition

Une enzyme est une macromolécule de nature protéique caractérisée par son activité catalytique gouvernant des réactions biochimiques spécifiques au sein de l'organisme. Les enzymes ont une grande spécificité d'action et de substrat. Ces protéines sont présentes dans toutes cellules vivantes et ce sont elles qui rendent possible la biochimie complexe du métabolisme cellulaire, que ce soit chez les végétaux, les animaux ou les microorganismes (Montézin *et al.*, 2004).

Selon Samah, 2010 ils sont de nature protéique, c'est-à-dire résultant de la condensation d'acides α aminés de la série L avec formation d'une liaison amide entre le groupe carboxyle d'un acide aminé. La chaîne polypeptidique obtenue se replie sur elle-même grâce à différents types de liaisons, pour donner un édifice tridimensionnel bien défini (**figure 1**). La diffraction des rayons X sur des cristaux d'enzyme permet de décrire cette structure dans laquelle on distingue une cavité où s'effectue la réaction catalysée par l'enzyme. Cette cavité est appelée site actif (**figure 2**), lieu de fixation du substrat.

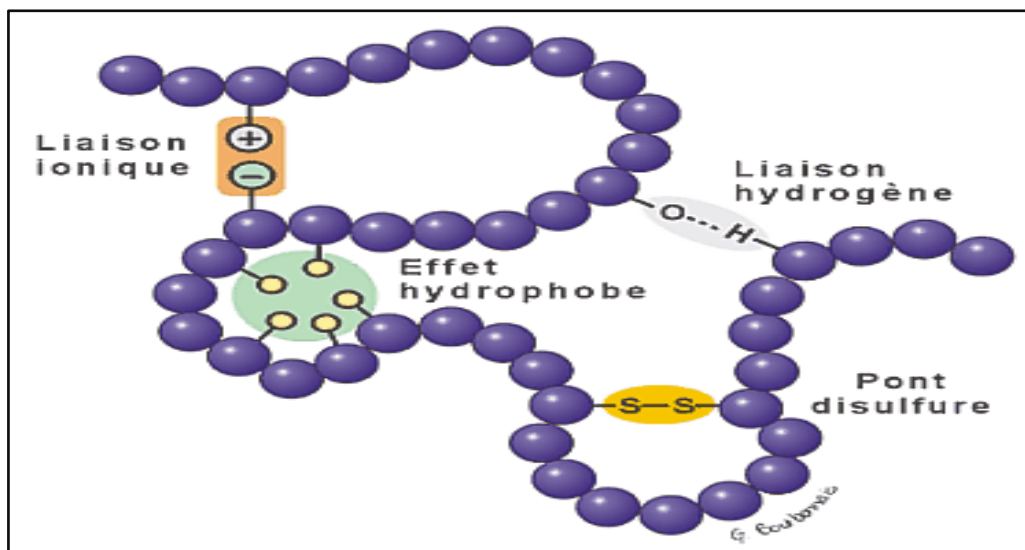


Fig.1: Structure tertiaire d'une protéine (Samah, 2010).

Les enzymes peuvent diminuer l'énergie d'activation, qui est l'énergie nécessaire pour transporter toutes les molécules d'une réaction chimique à l'état réactif, par conséquent, les enzymes augmentent la vitesse de réaction. Chaque enzyme catalyse juste une réaction spécifique ou un groupe de réactions étroitement liées. Comme représenté sur **la Figure 2**, l'enzyme correspond dans le temps à la molécule sur laquelle l'enzyme agit, également appelée substrat enzymatique, pour former le complexe enzyme-substrat. Lorsque la réaction

se produit, le produit est libéré et l'enzyme revient à son état d'origine, prête à réagir avec un autre substrat (Collados *et al.*, 2020).

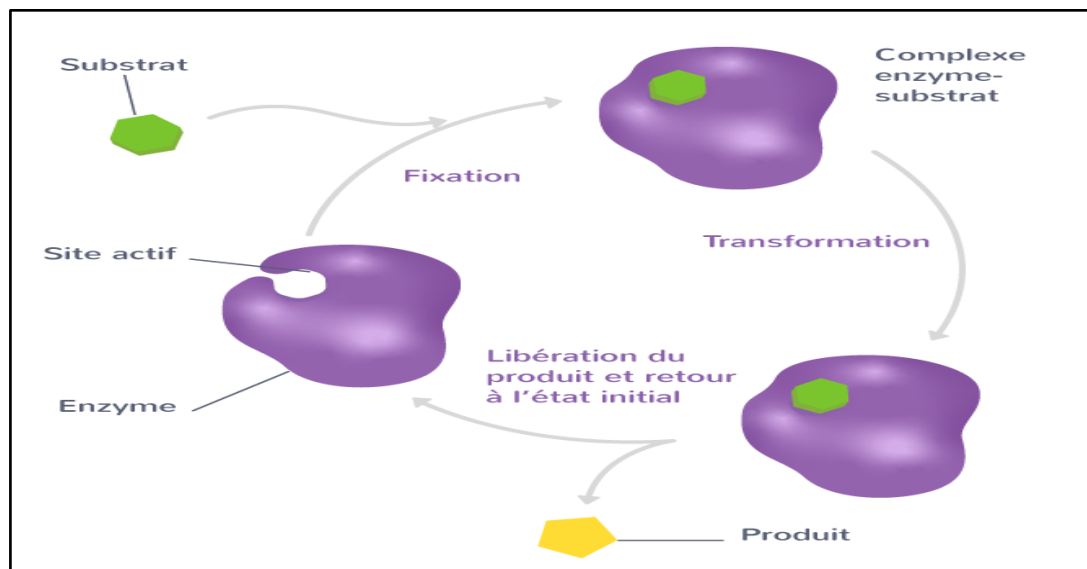


Fig.2: Mécanisme de catalyse enzymatique (Collados *et al.*, 2020).

2.Schéma de classification et de numérotation des enzymes

Traditionnellement, les noms d'enzymes se terminent par «ase». Certaines exceptions à cette règle sont les enzymes protéolytiques, telles que la trypsine et la chymotrypsine, qui se terminent par «in» (Subin et bhat, 2016). La première EC, dans son rapport de 1961, a conçu un système de classification des enzymes qui sert également de base pour leur attribuer des numéros EC (Enzyme Commission). Ces numéros de code (préfixés par EC), qui sont maintenant largement utilisés, contiennent quatre éléments séparés par des points (par exemple, 1.1.1.1) (Ako et Nip, 2006) avec la signification suivante :

- ❖ Le premier chiffre représente le type de réaction catalysée. Actuellement, six classes de réaction sont reconnues, comme le résume **le tableau 1** et **le tableau 2**.
- ❖ Le deuxième chiffre du numéro CE fait référence à la sous-classe, qui contient généralement des informations sur le type de composé ou de groupe impliqué.
- ❖ Le troisième chiffre, la sous-sous-classe, spécifie en outre la nature de la réaction.
- ❖ Le quatrième chiffre est un numéro de série qui est utilisé pour identifier l'enzyme individuelle dans une sous-sous-classe (Fleischmann *et al.*, 2004).

Ou selon Spinnler (2013) composée de quatre chiffres (EC A.B.C.D.), EC : enzymes commission, A : indique le type de réaction au quelle l'enzyme est rattachée, B : indique le type de substrat pour lequel l'enzyme est activée, C : indique la nature du Co solvant, D: correspond au numéro individuel de chaque enzyme.

Tableau 1: Les six classes de réaction utilisées dans la liste des enzymes (Fleischmann *et al.*, 2004).

Classe	Nom	Réaction catalysée
1	Oxydoréductase	$AH_2 + B = A + BH_2$ ou $AH_2 + B^+ = A + BH + H^+$
2	Transfèrase	$AX + B = A + BX$
3	Hydrolase	$AB + H_2O = AH + BOH$
4	Lyase	$A=B + X-Y = A-B$
		$\begin{array}{c} \quad \\ X \quad Y \end{array}$
5	Isomérase	$A = B$
6	Ligase	$A + B + NTP \rightarrow A-B + NDP + P$ ou $A + B + NTP = A-B + NMP + PP$

Les enzymes peuvent être classées en fonction du type de réaction chimique qu'elles catalysent. Officiellement, six groupes d'enzymes ont été classés **le tableau 2** :

EC 1 : oxydoréductases : catalysent les réactions d'oxydation/réduction qui impliquent généralement le transfert d'électrons. Les oxydases ou les déshydrogénases en sont des exemples.

EC 2 : transférases : transfèrent un groupe fonctionnel (par exemple, un groupe méthyle ou phosphate) et impliquent généralement le transfert d'un radical. Exemples : transglycosidases, par exemple de monosaccharides, transphosphorylases et phosphomutases, par exemple d'un groupe phosphate, transaminases, par exemple d'un groupe amino, transméthylases, par exemple d'un groupe méthyle, et transacétylases, par exemple d'un groupe acétyle.

EC 3 : hydrolases : catalysent l'hydrolyse de diverses liaisons. La réaction de l'hydrolase implique généralement l'addition ou l'élimination d'eau. Exemples : les hydrolases, notamment les estérases, les carbohydrases, les nucléases, les désaminases, les amidases et les protéases, les hydrolases telles que la fumarase, l'énolase, l'aconitase et l'anhydrase carbonique (van Oort, 2010).

EC 4 : Lyases : sont des enzymes qui coupent les liaisons C-C, C-O, C-N et autres par des moyens autres que l'hydrolyse ou l'oxydation. Elles diffèrent des autres enzymes en ce que deux substrats sont impliqués dans une direction de réaction, mais un seul dans l'autre de la réaction, mais un seul dans l'autre sens. Lorsqu'elle agit sur le substrat unique, une molécule est éliminée, laissant un résidu insaturé. Le nom systématique est formé selon à "groupe de substrat-lyase" . Dans les noms communs, des expressions comme décarboxylase, aldolase, etc. sont utilisées. Le terme "déshydratase" est utilisé pour les enzymes qui éliminent l'eau.

Dans les cas où la réaction inverse est la plus importante, ou la seule à être démontrée, on peut utiliser le terme "synthase" dans le nom (Subin et bhat, 2016).

EC 5 : Isomérases : (racémases, épimérases, cis-trans-isomérases, isomérases, tautomérases, mutases, cycloisomérases) : Ces enzymes catalysent les changements au sein d'une molécule (Ako *et al.*, 2006).

EC 6 : Ligases (synthases): également appelées synthétases, catalysent la synthèse de nouvelles liaisons entre deux molécules. Elles relient les molécules par des liaisons covalentes dans les réactions de biosynthèse. Ces réactions nécessitent un apport d'énergie par l'hydrolyse d'une liaison diphosphate dans l'ATP ou un triphosphate similaire, et cette propriété ajoute à la difficulté de leur application commerciale. Le deuxième chiffre indique le type de liaison synthétisée (Subin et bhat, 2016).

Tableau 2: Classification des enzymes (Taalibi boukerche, 2007).

N°	Classe	Réactions catalysées
1	Oxydoréductases	Oxydation, réduction (oxygénation des C-H, C-C, C=C).
2	Transférases	Transfert des groupements fonctionnels (aldéhydiques, cétoniques, acyles, sucres, phosphoryles ou méthyles).
3	Hydrolases	Hydrolyse/formation des esters, amides, époxydes, nitriles anhydrides.
4	Lyases	Addition/élimination des petites molécules sur les liaisons (C=C, C=N, C=O).
5	Isomérases	Réaction d'isomérisations telles que les réactions de racémisation et d'épimérisation.
6	Ligases	Formation/clivage des liaisons C-O, C-S, C-N, C-C, avec clivage simultané de triphosphate.

3. propriétés des enzymes

Les enzymes sont des catalyseurs possédant d'excellentes propriétés (haute activité, sélectivité et spécificité) qui peuvent permettre de réaliser les processus chimiques les plus complexes dans les conditions expérimentales et environnementales les plus bénignes. Ainsi, l'ingénierie des enzymes des entités biologiques aux réacteurs industriels est un objectif très passionnant (Simpson *et al.*, 2012).

A ce jour, les propriétés des enzymes présentes sur le marché limitent leur utilisation à certains procédés de production industrielle. Les enzymes ne sont en effet actives que dans des plages de température ou de pH très réduites. Elles sont inactivées à haute température, en

présence de solvants ou de concentrations salines inappropriées. Par ailleurs, les réactions chimiques industrielles mettent souvent en jeu des substrats très éloignés des substrats naturels transformés par les enzymes dans les cellules vivantes.

Le défi aujourd'hui consiste donc à découvrir des enzymes qui répondent très exactement aux contraintes techniques et économiques des procédés de biocatalyse industriels modernes : Enzymes plus stables (résistantes à la température, aux solvants...), plus actives (gain de temps, rendement), plus sélectives (chiralité, pureté des produits, élimination des sous-produits), ou catalysant des réactions que les enzymes actuelles ne savent pas réaliser (Lefèvre *et al.*, 2002).

4.Sources des enzymes alimentaires

Les préparations enzymatiques utilisées dans les industries alimentaires sont obtenues à partir de sources animales, végétales ou microbiennes et peuvent être constituées de cellules entières, de parties de cellules ou d'extraits acellulaires de la source utilisée **le tableau 3** (Collados *et al.*, 2020). Des exemples d'enzymes végétales α -amylase, la β -amylase, la bromélaïne, la β -glucanase, ficine, la papaïne, la chymopapaïne et la LOX, parmi les enzymes animales, on peut citer les trypsines, les pepsines, les chymotrypsines, la catalase, l'amylase pancréatique l'amylase pancréatique, la lipase pancréatique et la présure, et des exemples d'enzymes microbiennes enzymes microbiennes sont l' α -amylase, la β -amylase, la glucose isomérase, pullulanases, cellulase, catalase, lactase, pectinases, pectine lyase, invertase, raffinose, lipases microbiennes et protéases (Simpson *et al.*, 2012).

Selon Schuster (2008) la majorité des enzymes d'origine animale et végétale ne peuvent survivre aux conditions extrêmes de la transformation des aliments. Bien que les enzymes d'origine animale et végétale soient largement acceptables dans l'industrie alimentaire, l'utilisation d'enzymes microbiennes est également souhaitée et préférée car elles présentent plus d'avantages en raison de la spécificité et de la stabilité plus élevées des enzymes produites. Par exemple, la présure d'origine microbienne a remplacé l'utilisation de la présure animale pour cailler le lait dans l'industrie fromagère, un tiers de la présure utilisée dans la fabrication du fromage étant d'origine microbienne ces dernières années.

Tableau 3: Sources des principales enzymes et leurs applications (Subin et bhat, 2012).

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 porcin 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	Aspergillus niger Pénicillium fréquentans Bacillus acidopollulyticus	Fermentation des produits laitiers. Fermentation des vins. La transformation du sucre en alcool qui se produit dans le vin.

Dans l'industrie alimentaire, les substituts d'enzymes ne sont pas aussi efficaces que les enzymes, qui présentent des propriétés uniques telles que la spécificité suprême; la capacité de fonctionner dans des conditions douces de pH, de température et de pression tout en affichant des chiffres d'activité et de renouvellement élevés; et la propriété de biodégradabilité, car les enzymes sont d'origine biostatique et plus ou moins biologique, ce qui en fait des candidats idéaux pour une application dans l'industrie alimentaire (Bommarius et Riebel-Bommarius, 2004).

5. Contrôle de l'activité enzymatique dans les aliments

L'action des enzymes dans les aliments n'est pas toujours souhaitable. Par exemple, la poursuite de l'activité enzymatique dans les aliments après qu'ils ont été utilisés pour obtenir la transformation souhaitée pourrait nuire à la qualité des aliments. La présence naturelle de

certaines enzymes dans les matières agricoles (par exemple, LOX, PPO, peroxydases et lipases) peut induire des changements indésirables (par exemple, perte de couleur, décolorations foncées et rancissement) dans les aliments, l'action de certaines enzymes naturelles (par exemple, les histidine décarboxylases) peut également avoir un effet négatif sur la qualité des aliments, histidine décarboxylases) peut produire des composés toxiques (amines biogènes) dans les produits alimentaires, et d'autres enzymes encore (par exemple, la thiaminase et l'acide ascorbique oxydase) peuvent agir en détruisant des composants alimentaires essentiels (par exemple, les vitamines B1 et C). Il est donc nécessaire de contrôler l'activité enzymatique dans les denrées alimentaires pour éviter les effets délétères potentiels qu'elles provoquent dans ces produits.

Plusieurs facteurs sont connus pour affecter l'activité enzymatique et influencer leur comportement dans les aliments. Ces facteurs comprennent la température, le pH selon le **tableau 4**, l'activité de l'eau (A_w) et les produits chimiques (inhibiteurs, agents chélateurs et agents réducteurs), et les technologues et les fabricants de produits alimentaires en tirent parti pour développer ou rationaliser les procédures de contrôle de l'activité enzymatique dans les aliments (Simpson *et al.*, 2012).

Tableau 4: Stabilité au pH de certaines enzymes (Simpson *et al.*, 2012).

Enzyme	pH Stabilité Optimum
Pepsine	1,5
Amylase de malt	4,5-5,0
Invertase	4,5
Lipase gastrique	4,0-5,0
Lipase pancréatique	8,0
Maltase	6,5
Catalase	7,0
Trypsine	8,0

"CHAPITRE II"

Applications industriels

1. Les enzymes en industrie

De nos jours, la Commission européenne définit l'enzyme alimentaire comme « un produit obtenu à partir de plantes, d'animaux ou de microorganismes ou de leurs produits » **la figure 3** (Collados *et al.*, 2020). L'utilisation d'enzymes dans les préparations alimentaires est un processus séculaire. Avec l'avancement des technologies, de nouvelles enzymes avec une large gamme d'application et de spécificité ont été développées. Les enzymes jouent un rôle prépondérant dans l'industrie alimentaire. Les conversions enzymatiques présentent de nombreux avantages, notamment un moindre besoin en énergie et une haute spécificité qui en font des transformateurs attrayants dans l'industrie alimentaire. Diverses enzymes utilisées dans la transformation des aliments sont incluses dans **le tableau 5** (Binod *et al.*, 2019). Montézin *et al.* (2004) ont montré que les matières premières entrant dans la fabrication de préparations alimentaires subissent des transformations par des enzymes ou des cocktails d'enzymes. Ces transformations enzymatiques sont mises en œuvre dans la production de nombreux produits agroalimentaires comme les produits laitiers, les boissons, les produits de boulangerie et de pâtisserie, les produits de l'alimentation animale. Ces procédés industriels sont le plus souvent fondés sur un savoir-faire artisanal très ancien.

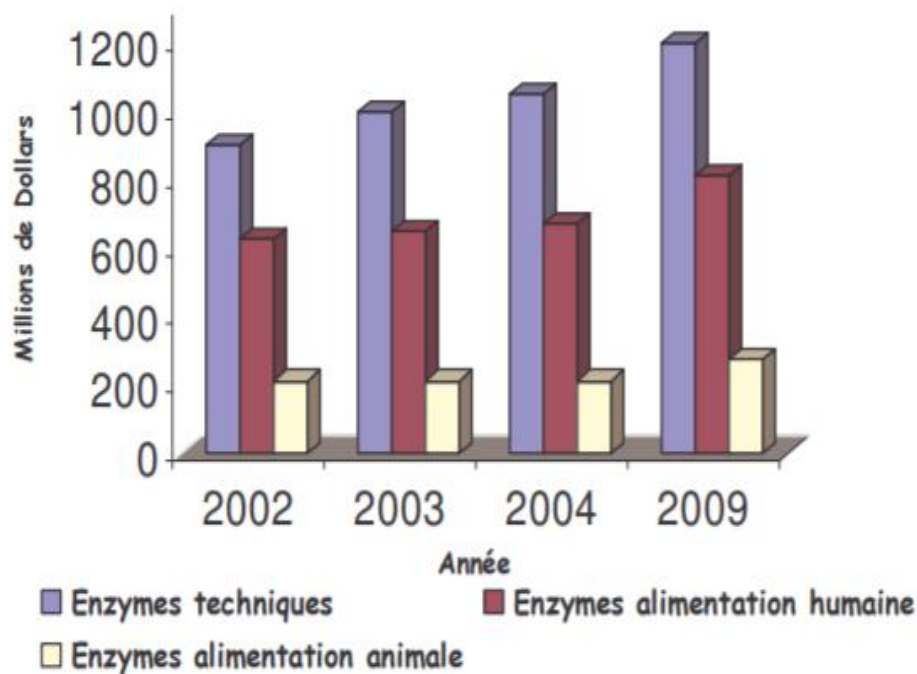


Fig.3:Répartition et évolution du chiffre d'affaire des enzymes industrielles par secteur d'activité en millions de dollars pour la période 2002-2009 (Tourrasse, 2005).

Tableau 5 :Sélection d'enzymes utilisées dans l'industrie alimentaires (Berry et Paterson, 1990).

Enzymes	Application
Amylase	Production de sirop de glucose brassage, traitement des fruits cuits
Cellulase	Traitement des fruits, production d'arômes
Pectinase	Production d'arômes, fromage modifié
Protéase	Synthèse d'émulsifiants

2. Grandes classes d'enzymes d'intérêt dans la transformation des aliments

2.1. Hydrolases et lyases actives sur les composants des parois végétales

Ces enzymes sont très largement utilisées pour faciliter la clarification des jus de fruits en améliorant les opérations de filtration ou de décantation. Il peut s'agir de cellulases, pectinases, xylanases...etc (Spinnler, 2013).

2.1.1. Cellulases

La cellulose est un polysaccharide composé de plusieurs unités de glucose et les cellulases favorisent son hydrolyse. Ces enzymes sont des biocatalyseurs très spécifiques qui agissent en synergie pour libérer des sucres, dont le glucose a une importance industrielle majeure en raison de la possibilité de sa conversion en éthanol, édulcorants, phytohormones et acides organiques (Fleuri *et al.*, 2015). C'est la deuxième enzyme industrielle la plus utilisée après la protéase (Binod *et al.*, 2019). Les cellulases sont des enzymes qui hydrolysent les enchaînements linéaires β -1,4 de glucose (Spinnler, 2013).

Pour la dégradation de la cellulose, l'action combinée de plusieurs enzymes est nécessaire. La cellulase (endo1,4- β -D-glucanase EC 3.2.1.4) est la plus importante. Cinq types généraux de cellulases, basés sur le type de réaction catalysée, peuvent être identifiés. L'endocellulase brise les liaisons internes pour rompre la structure cristalline de la cellulose et exposer les chaînes polysaccharidiques individuelles de la cellulose; l'exocellulase clive 2 à 4 unités des extrémités des chaînes exposées produites par l'endocellulase, ce qui donne des tétrasaccharides ou des disaccharides tels que le cellobiose. Il existe deux principaux types d'exocellulases (cellobiohydrolases (CBH); EC 3.2.1.91). Un type travaillant progressivement à partir de l'extrémité réductrice, et un type travaillant progressivement à partir de l'extrémité non réductrice de la cellulose ; la cellobiase ou β -glucosidase hydrolyse le produit de

l'endocellulase en monosaccharides individuels ; les cellulases oxydatives qui dépolymérisent la cellulose par des réactions radicalaires, comme par exemple la cellobiose déshydrogénase et les cellulose phosphorylases qui dépolymérisent la cellulose en utilisant des phosphates au lieu de l'eau. La décomposition de la cellulose est représentée schématiquement à **la figure 4** (Whitehurst et Van Oort, 2010).

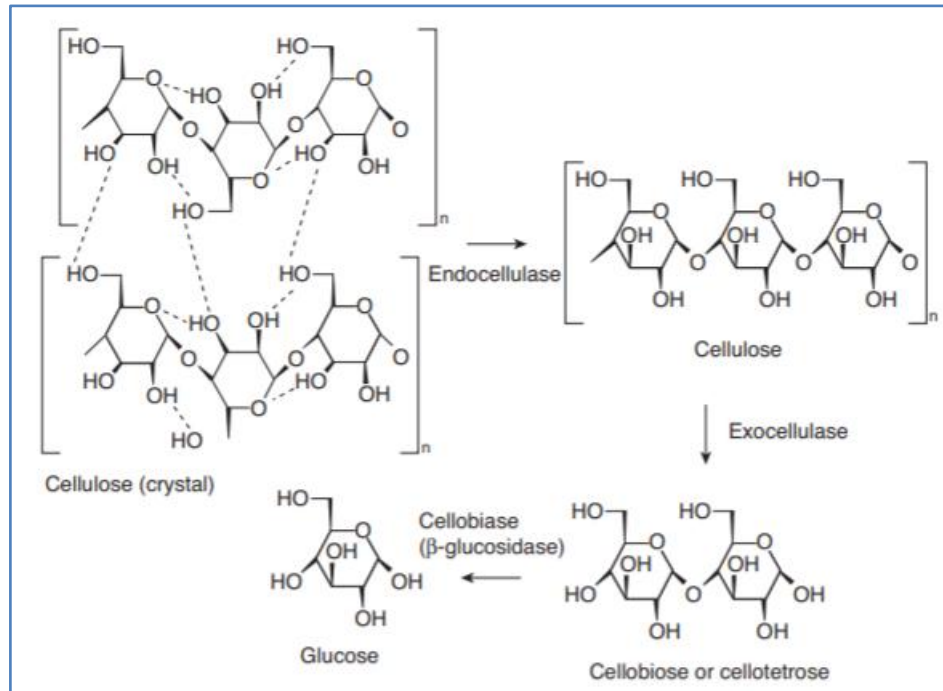


Fig.4: Dégradation de la cellulose par les endoet exo-cellulases et la cellobiase (Whitehurst et Van Oort, 2010).

2.1.2.Pectinases

Les pectines sont des polymères pouvant être gênants dans des procédés d'extraction et de clarification de jus de fruits. Les pectinases permettent une augmentation des rendements d'extraction et facilitent la clarification des jus. De même, les pectinases peuvent être mises en œuvre pour faciliter l'extraction d'huile à partir de graines ou de fruits oléagineux. Enfin, elles peuvent être utiles pour l'extraction de fractions fonctionnelles de matières premières riches en antioxydants, en huiles essentielles par exemple, ou pour favoriser la libération d'arômes à partir des précurseurs glycosylés d'arôme présents dans un grand nombre de fruits (Spinnler, 2013). En général les préparations pectinolytiques contiennent un mélange de trois types d'enzymes en proportion variées :

- ✓ Les pectines estérases qui hydrolysent les liaisons entre l'acide galacturonique et les alcools (principalement méthanol et éthanol), en effet, ces derniers estérifient fréquemment la fonction acide libre de l'acide galacturonique.
- ✓ Les pectines hydrolases.

- ✓ Les pectines lyases qui séparent les acides galacturoniques en formant une double liaison (Buchert *et al.*, 2007).

Les pectinases d'origine microbienne et végétale ont donc reçu beaucoup d'attention. D'un point de vue industriel, les pectinases sont classées en deux types, les pectinases "acides" et "alcalines". Les pectinases acides ont de nombreuses applications dans l'extraction et la clarification des jus limpides (pomme, poire, raisin et vin) et troubles (citron, orange, ananas et mangue) et la macération des tissus végétaux (**tableau 6**). De plus, les pectinases acides sont utiles pour l'isolement des protoplastes et la saccharification de la biomasse. Les pectinases alcalines ont des applications potentielles dans la fermentation du café et du thé (Polaina et MacCabe, 2007).

Tableau 6: Applications industrielles des pectinases (Polaina et MacCabe, 2007).

Application	Objectif
-Stabilisation des nuages	-Pour précipiter les matières hydrocolloïdes présentes dans les jus de fruits.
-Clarification des jus de fruits	-Dégradation des substances pectiques formant des nuages. Ainsi, le jus peut être facilement filtré et traité.
-Extraction du jus et de l'huile	-Extraction du jus et de l'huile, pour surmonter la difficulté de presser la pulpe des fruits pour obtenir du jus et de l'huile.
-Macération	-Pour décomposer les tissus des légumes et des fruits afin d'obtenir des produits pulpeux utilisés comme matière première pour les jus, le nectar comme dans le cas des aliments pour bébés, le pudding et le yaourt.
-Liquéfaction	-Pour décomposer les hydrates de carbone fermentescibles des plantes en sucres simples par des enzymes.
-Gélification	-Pour gélifier les produits à base de fruits à faible teneur en sucre.
-Fermentation du café et du thé	-Éliminer la couche de mucilage du grain de café grain de café. Améliorer la fermentation du thé et la propriété de formation de mousse du thé.

2.1.3.Amylases et Pullulanases

L'alpha-amylase (EC 3.2.1.1) est une enzyme industrielle, largement présente chez les animaux, les végétaux et les microorganismes **la figure 5**. C'est une macromolécule appartenant à la famille des glycosides hydrolases nommée GH13, de type endoglycanases.

Elle hydrolyse, les liaisons osidiques α (1 $\rightarrow$ 4) de l'amidon en libérant le glucose, le maltose, le maltotriose et de la dextrine (Atek et Benouali, 2016).

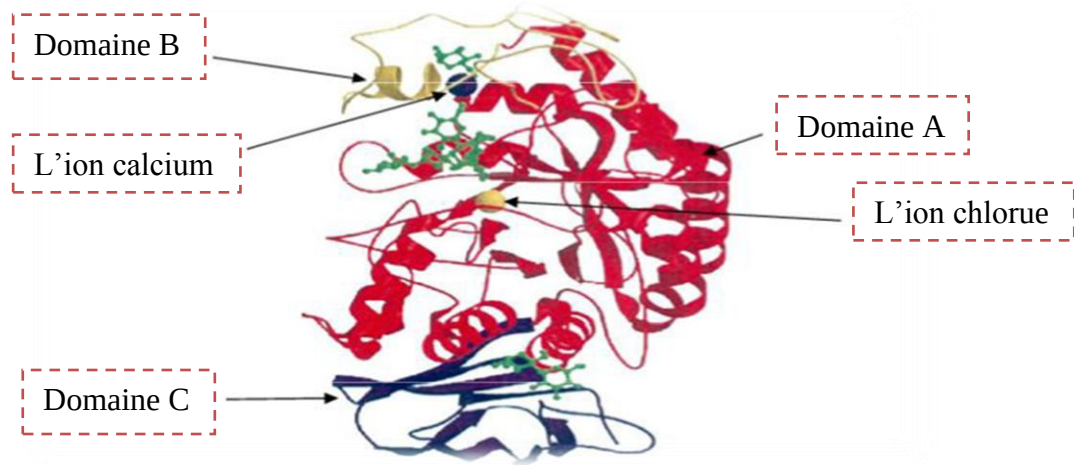


Fig.5 : Structure tridimensionnelle d'une enzyme alpha-amylase (Atek et Benouali, 2016).

La pullulanase (également appelée " enzyme de débranchement ") est une glucanase spécifique qui dégrade le pullulan, un glucide constitué d'unités répétitives du trisaccharide maltotriose reliées entre elles par des liaisons α -1,6 glycosidiques. Selon la nature de la liaison glycosidique clivée, on distingue deux types de pullulanases **la figure 6**. Les pullulanases de type I clivent les liaisons α -1,6, tandis que les pullulanases de type II hydrolysent à la fois les liaisons α -1,4 et α -1,6. Les pullulanases sont produites par des bactéries (par exemple, *B. cereus* et *Klebsiellasp*), et on les trouve également dans les plantes (par exemple, riz, blé, maïs) (Simpson *et al.*, 2012).

L'utilisation d'amylases a permis la conversion de l'amidon en oligosaccharides d'une manière plus compétitive et respectueuse de l'environnement. Trois types principaux peuvent être trouvés :

1. L' α -amylase (EC 3.2.1.1).
2. La β -amylase (EC 3.2.1.2).
3. La γ -amylase (EC 3.2.1.3) (Sanromán et Deive, 2017).

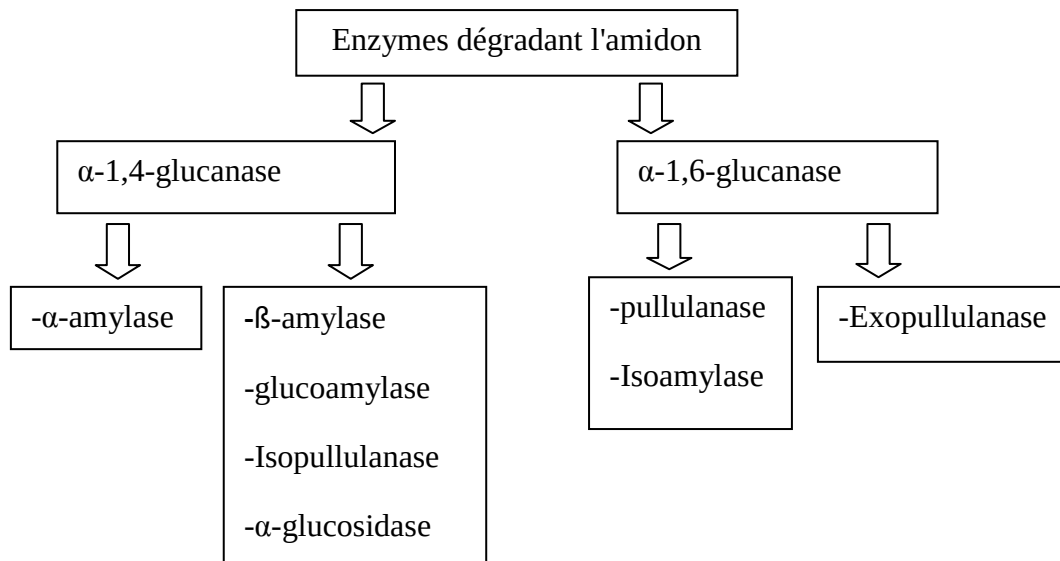


Fig.6: Enzymes de dégradation de l'amidon (Polaina et MacCabe, 2007).

2.1.4. Hémicellulases

Les hémicelluloses ou pentosanes sont des polymères de pentoses qui peuvent gêner le développement de caractéristiques organoleptiques dans les produits de panification ou les viennoiseries. Ce sont, en outre, des produits gênant certaines opérations technologiques, comme la filtration (Spinnler, 2013). L'une des applications les plus traditionnelles des hémicellulases fait référence à leur utilisation dans l'extraction de l'huile d'olive, car ce processus a un effet significatif sur la qualité du produit final. Bien que les stratégies d'extraction conventionnelles basées sur l'application de pression et de centrifugation aient été monnaie courante, diverses limitations concernant les rendements d'extraction ont favorisé l'utilisation de procédés microbiens ou assistés enzymatiques. Cette méthode a également été appliquée à d'autres types d'huiles telles que l'huile de citrouille (Sanromán et Deive, 2017).

2.2. Protéases et Peptidases

Les protéases et peptidases sont des enzymes qui hydrolysent la liaison peptidique des protéines pour libérer des peptides ou des acides aminés. On distingue les endoprotéases, qui coupent les protéines au milieu de la chaîne (chymosine, pepsine...), des exopeptidases (amino peptidases et carboxypeptidases) qui hydrolysent les acides aminés aux extrémités de la chaîne (Spinnler, 2013). Les protéases sont utilisées dans la production du fromage, du pain, des hydrolysats de soja et l'attendrissement de la viande (Boukahili *et al.*, 2020). Selon Polaina et MacCabe (2007) ont mentionné, les peptidases ont de nombreuses utilisations industrielles. Les plus anciennes concernaient la fabrication de fromage, en utilisant d'abord des jus de plantes pour coaguler le lait, puis de la "présure". Les peptidases sont également

utilisées pour attendrir la viande, clarifier les bières et rehausser le goût des fromages. Actuellement les endoprotéases sont classées en six familles :

- ❖ les protéases à sérine (EC 3.4.21).
- ❖ les protéases à thréonine (EC 3.4.25).
- ❖ les protéases à cystéine (EC 3.4.22).
- ❖ les protéases à acide aspartique (EC 3.4.23).
- ❖ les protéases à acide glutamique.
- ❖ Les métalloprotéases (EC 3.4.24) (Spinnler, 2013).

La plupart des applications industrielles majeures de ces enzymes sont décrites dans le **tableau 7** (Polaina et MacCabe, 2007).

Tableau 7: Principales applications industrielles des protéases (Polaina et MacCabe, 2007).

Application	Enzymes utilisés	Utilisations
Industrie de la boulangerie	bromélaïne, papaïne	Abaissement du taux de protéines de la farine dans la fabrication des biscuits, relaxation de la pâte, prévention du retrait de la pâte, amélioration du volume du pain, de sa friabilité et de l'uniformité du brunissement.
Industrie brassicole	bromélaïne, papaïne	Elimination des troubles pendant le stockage des bières, fractionnement des protéines dans le malt.
Industrie laitière	bromélaïne, papaïne	Hydrolysats de lactosérum, édulcorant, affinage du fromage.
Industrie alimentaire	bromélaïne, papaïne et cathepsines	Attendrisseur pour la viande, fabrication de nutriments de haut niveau, fabrication de produits à base de protéines solubles et petit-déjeuner, céréales et boissons, stabilisation de la gélatine, aliments diététiques, rippage d'aliments fermentés secs.

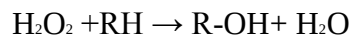
2.3.Enzymes ayant des propriétés antimicrobiennes

2.3.1.Lysozyme

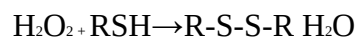
Le "lysozyme" (EC 3.2.1.17) est la première enzyme à avoir été séquencée (Spinnler, 2013). Selon Fraatz *et al.* (2013) le "lysozyme" a été découvert par Sir Alexander Fleming en 1922 et a été largement étudié depuis lors. Il est devenu l'un des rares antimicrobiens naturels approuvés pour une utilisation dans les aliments dans " l'Union européenne " (E 1105). La principale application du lysozyme est d'empêcher la croissance de bactéries à Gram positif dans les fromages semi durs. D'autres applications incluent le contrôle de la détérioration du vin, Bière, poisson et de la viande. Les peroxydases ont été appliquées pour la dégradation des caroténoïdes utilisés pour la coloration du fromage. Le lactosérum résultant de la production de fromage coloré a une teinte orange-jaunâtre, qui interfère avec l'utilisation ultérieure du lactosérum.

2.3.2.Peroxydases

Les "peroxydases" (EC.1.11.1.7) sont un groupe diversifié d'oxydoréductases, Ce sont des enzymes oxydases qui utilisent le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) comme catalyseur pour l'oxydation des monophénols, diphénols, polyphénolset autres (Buchert *et al.*, 2007). selon des réactions du type :



Ou



Il existe aussi des haloperoxydases capables d'oxyder les ions halogénures qui sont capables de se fixer sur des noyaux benzéniques et de faire la synthèse des composés organochlorés qui peuvent être malodorants (chloroanisoles) ou conduire à des pertes de couleur. La lactoperoxydase (EC 1.11.1.7) est capable, à partir du peroxyde d'hydrogène, de produire des composés antimicrobiens (Spinnler, 2013).

3.Maîtrise et amélioration des propriétés technologiques

Les enzymes peuvent améliorer ou modifier les propriétés fonctionnelles et sensorielles des aliments et des composants alimentaires. L'utilisation d'enzymes dans les aliments traditionnels comme la bière, le fromage ou les préparations alimentaires fermentées est un processus séculaire. Cependant, avec les progrès de la biotechnologie au fil des ans, les enzymes ont joué un rôle majeur dans la transformation et la production des aliments, au développement des produits innovants par l'application d'enzymes, y compris les

modifications de la texture, de la saveur et de l'arôme des aliments, permettant des avantages dans un large éventail de processus industriels (Collados *et al.*, 2020).

3.1. Maîtrise des qualités organoleptiques des aliments

Depuis longtemps les enzymes jouent un rôle important dans les caractéristiques des aliments. Elles agissent :

- ✚ Soit en étant présentes naturellement dans les matières premières animales (lipase et protéase du lait et de la viande) ou végétales (protéase, oxydase et lipase dans les graines).
- ✚ Soit en provenant de micro-organismes contaminants ou ajoutés sous forme de levain (amylase de levure, lipase et protéase de champignon ou bactérie intervenant dans l'affinage des fromages), ces micro-organismes produisent souvent plusieurs enzymes capables de catalyser une séquence de réactions (par exemple, c'est le cas des préparations de souches aromatisants).
- ✚ Soit sous forme de préparation purifiée ajoutée à l'aliment, c'est le cas pour la chymosine, enzyme responsable de la coagulation du lait, pour les pectinases, enzymes permettant de réduire la viscosité des jus de fruits.

Beaucoup d'autres enzymes sont utilisées en technologie alimentaire pour modifier la texture (protéases, amylases...), l'arôme (lipase) ou la saveur (protéase). Dans de nombreux cas, les modifications sensorielles engendrées par les enzymes sont indésirables soit par la simple présence des produits de la réaction, soit par une quantité excessive de ceux-ci si la réaction est trop prononcée. La maîtrise des propriétés sensorielles passe nécessairement par l'inhibition de certaines activités (traitement thermique de végétaux nécessaire pour détruire les oxydases responsables de brunissement et de défauts de goût) ou par des pratiques technologiques ne favorisant pas les activités enzymatiques indésirables (Linden, 1998).

4. Principales application des enzymes dans l'industrie agro-alimentaire

Les enzymes ont une grande utilité dans la fabrication par l'industrie alimentaire de divers produits et marchandises, y compris la production d'arômes, de sirops, de confiseries, de produits laitiers, de boissons alcoolisées et de fruits, de levures pour produits de boulangerie et d'hydrolysats de lactose de lactosérum. Les utilisations de ces enzymes dans les aliments entraînent des changements souhaitables en ce qui concerne les améliorations de l'aspect, de la consistance, de la saveur, de la solubilité, de la texture et du rendement, entre autres. Des enzymes sont également utilisées pour clarifier les jus de fruits et éliminer l'amertume du jus d'agrumes. Une autre application principale des enzymes utilisées pour

prolonger la durée de conservation et améliorer la qualité des aliments (Yushkova *et al.*, 2019). Les utilisations des enzymes pour les applications alimentaires sont résumées dans le **tableau 8** (Schäfer *et al.*, 2006). Selon Sanromán et Deive (2017), deux rôles principaux ont été attribués aux enzymes dans la transformation des aliments:

- ✚ Transformer les matières premières en un produit principal, comme cela se produit lors de l'ajout de présure au lait pour fabriquer du fromage.
- ✚ Ou en tant qu'additifs pour modifier des propriétés comme la saveur, la texture, l'usinabilité, etc. comme indiqué pour l'addition d'amylase pour améliorer la structure de la chapelure ou des lipoxygénases pour blanchir les composés caroténoïdes présents dans la pâte pendant la fabrication du pain.

Tableau 8: Aperçu de l'utilisation des enzymes dans les applications alimentaires (Schäfer *et al.*, 2006).

Application	Avantages	Enzymes utilisés
Pâtisserie et snacks Prolongation de la durée de conservation De la pâte	Augmenter la durée de conservation et améliorer la qualité Exo et endo-amylases en conservant la douceur, l'élasticité et l'humidité. Assurer un bon volume de pain uniforme et bonnes propriétés de manipulation de la pâte.	Xylanases (hémicellulase)
Produits laitiers Coagulation du fromage	Formation du caillé du fromage	Chymosine Protéases spécifiques
Traitement des jus et légumes Traitement du moût Clarification Raffermissement des fruits	Améliorer le rendement des jus par l'ajout de mélanges de pectinase. d'enzyme au moût. Prévenir le trouble dans les mélanges de jus. Raffermer la surface des morceaux de fruits.	Pectinase
Viande et protéines Protéine Viande restructurée	Hydrolyse des protéines comme le soja et le gluten par exemple pour les saveurs salées, amélioration de la texture des saucisses. Extraction de la saveur et des protéines Endo et exopeptidase.	Exopeptidase mélanges d'endoprotéases

4.1. Les produits laitiers

La formulation des produits laitiers implique l'utilisation de plusieurs enzymes, telles que les protéases (par exemple, les présures microbiennes ou leurs homologues provenant de veaux et d'autres ruminants), les lipases et les lactases. Les protéases sont utilisées pour précipiter les caséines du lait sous forme de "caillots" ou de "caillés" pendant la fabrication du fromage ; les protéases et les lipases favorisent également le développement du goût pendant la maturation du fromage et dans des produits tels que les blanchisseurs de café, les snacks, les soupes et les pâtes à tartiner (margarines) ; tandis que les lactases sont utilisées pour produire du lait et des produits laitiers sans lactose pour les personnes intolérantes au lactose. La catalase d'*A. Niger* est utilisée pour décomposer le H_2O_2 résiduel (qui est utilisé dans certains pays comme conservateur du lait et du lactosérum) en H_2O et O_2 qui ne sont pas toxiques contrairement au H_2O_2 (Simpson, 2012). Il existe diverses enzymes qui sont utilisées dans différents processus de production de produits laitiers. Quelques enzymes importantes ainsi que leurs applications sont traitées dans le **Tableau 9** (Subin et Bhat, 2016).

Tableau 9: Enzymes utilisées dans les industries laitières (Subin et Bhat, 2016).

Enzymes	Classed'enzymes	Sources	Applications
Protéinases et peptidases	EC.3.4.23.23	Bactéries lactiques "Lactobacillus acidophilus"	Préparations aromatisants à base de produits laitiers, par exemple fromage et lait
Lysozyme	EC. 3.2.1.17	Blanc d'œuf de poule, lait de vache, lait maternel, papaye	Substitut de nitrate pour les fromages à caillé lavé et les fromages avec les yeux (par exemple : Emmental)
Présure bovine (chymosine, pepsine)	EC. 3.4.23.4 EC. 3.4.23.1	Animal (veau, chèvre, mouton, lapin, vache et buffle), plante microbes	Coagulation dans la préparation du fromage, fromage cheddar, cottage fromage, fromage à la crème, fromage à la crème à tartiner, fromage à la crème à tartiner avec (nom des ingrédients ajoutés)

4.2. Usages dans la transformation des viandes (Les produits carnés)

La viande et ses produits sont très consommés dans le monde entier, et la tendreté est la principale caractéristique considérée par les consommateurs (Cazarin *et al.*, 2015). "La qualité organoleptique" (sensorielle) est un facteur primordial qui détermine la qualité de la viande et joue un rôle majeur dans la commercialisation "la quantité de graisse et la couleur de la viande". "La tendreté" est la principale caractéristique organoleptique et un déterminant de la qualité et de l'acceptabilité des viandes et de leurs produits. Cet attribut est important car la viande est cuite (consommée uniquement de cette façon pour la plupart des types de viande) et est fortement liée à l'acceptation du produit (Bekhit *et al.*, 2014).

4.2.1. L'utilisation d'enzymes protéolytiques dans les produits carnés

Le traitement par des enzymes protéolytiques est l'une des méthodes les plus populaires pour attendrir la viande (Maróstica et Pastore, 2010) les principales enzymes protéolytiques utilisées dans la transformation de la viande sont présentées dans **le tableau 10**. Les effets de l'utilisation d'enzymes dans la viande pour obtenir la tendreté du produit peuvent être obtenus par deux mécanismes. Premièrement, les enzymes peuvent catalyser la rupture des liaisons covalentes des protéines, générant des fragments de peptides ou d'acides aminés plus petits, modifiant ainsi la structure de la viande. Le second mécanisme implique l'utilisation de certaines enzymes qui peuvent favoriser la formation de liaisons covalentes nouvelles ou différentes dans la structure protéique native (trans-glutaminases), ce qui peut modifier la tendreté de la viande. Dans cette section, les enzymes qui peuvent rompre les liaisons covalentes des protéines sont abordées.

Tableau 10: Principales enzymes protéolytiques utilisées dans la transformation de la viande (Cazarin *et al.*, 2015).

Sources	Enzymes	Sources	Action
Les plantes	Papaïne Bromélaïne Ficin Actinidine	Papaye Ananas Figue Kiwi	Hydrolyse d'une large gamme de liaisons (liaisons peptide, amide, ester, thiol ester et thiono ester)
Micro-organismes	Protéase aspartique de collagénase Protéase fongique	<i>Clostridium histolyticum</i> <i>Aspergillus oryzae</i>	Peptidases
Animal	Pancréatine porcine	Porc	Élastase

La papaïne, la bromélaïne et la ficine sont les enzymes végétales les plus étudiées pour obtenir l'attendrissement de la viande post-mortem. Ce sont des endopeptidases avec une faible spécificité de substrat et sont capables de catalyser l'hydrolyse d'une large gamme de liaisons (peptide, amide, ester, et thiol ester et thiono ester). Ces enzymes exercent un effet protéolytique sur la myosine et d'autres protéines myofibrillaires, ce qui se reflète dans la tendreté de la viande. Certains producteurs commerciaux d'enzymes sont présentés dans le **tableau 11** (Cazarin *et al.*, 2015).

Tableau 10: Exemples de quelques enzymes commerciales utilisées dans la transformation de la viande (Cazarin *et al.*, 2015).

Protéase	Nom commercial	Activité déclarée Unités/mg
Papaïne	Panol® 300 Papaïne purifiée	>300 MCU
Bromélaïne	Enzeco® Bromélaïne 240	228-276 MCU
Ficine	Enzeco® Ficine 260	250-300 MCU
Aspergillus	Enzeco® Protéase fongique Concentré	400 HUT
Aspergillus	Enzeco® FungalProtease 400 Enzeco® Neutre Bactérien	400 HUT
Bacillus	Protéase 160 K	152-184 PC

HUT = unité d'hémoglobine, MCU = unité de caillot de lait, PC = unité protéolytique.

Les interventions post-mortem utilisées dans l'attendrissement de la viande fraîche peuvent être classées en trois catégories "physiques", "chimiques" et "enzymatiques" en fonction de leur mode d'action. Des actions physiques ou mécaniques provoquent une altération du tissu conjonctif et des réseaux protéiques myofibrillaires et stimulent la protéolyse par des interactions directes entre les enzymes endogènes, les cofacteurs et les substrats, ce qui peut réduire la palpabilité. Les interventions chimiques, bien qu'elles améliorent la texture de la viande. Un schéma du traitement utilisé pour l'attendrissement de la viande est présenté dans le **figure 7** (Cazarin *et al.*, 2015).

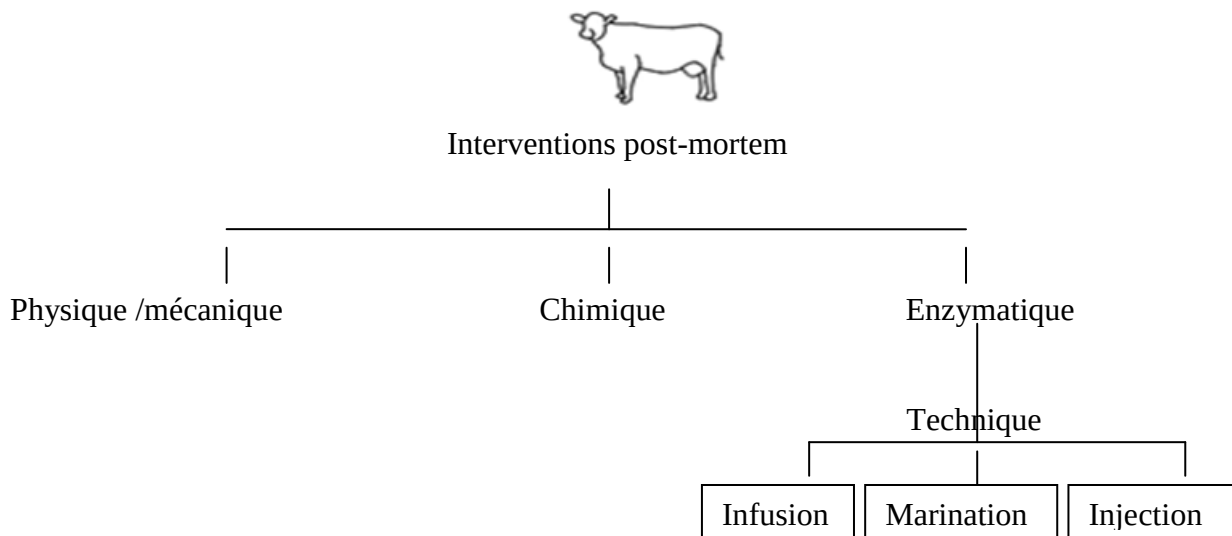


Fig.7: Schéma de traitement utilisé pour l'attendrissement de la viande (Cazarin *et al.*, 2015).

4.2.2.L'utilisation de la transglutaminase dans les produits à base de viande

La transglutaminase (TGase ; protéine-glutamine γ -glutamyltransférase, EC 2.3.2.13) est une enzyme ayant la capacité de d'améliorer les caractéristiques fonctionnelles des protéines, telles que la texture, la saveur et la durée de conservation (Maróstica et Pastore, 2010). Elle est une enzyme capable d'établir des liaisons peptidiques entre l'amine libre des acides aminés basiques et la fonction carboxylique des acides aminés acides (**figure 8**). Ces liaisons peptidiques permettent d'établir un réseau entre protéines. Cela peut être appliqué dans divers filières des industries alimentaires comme les produits carnés, les produits de la mer et les produits laitiers (Spinnler, 2013).

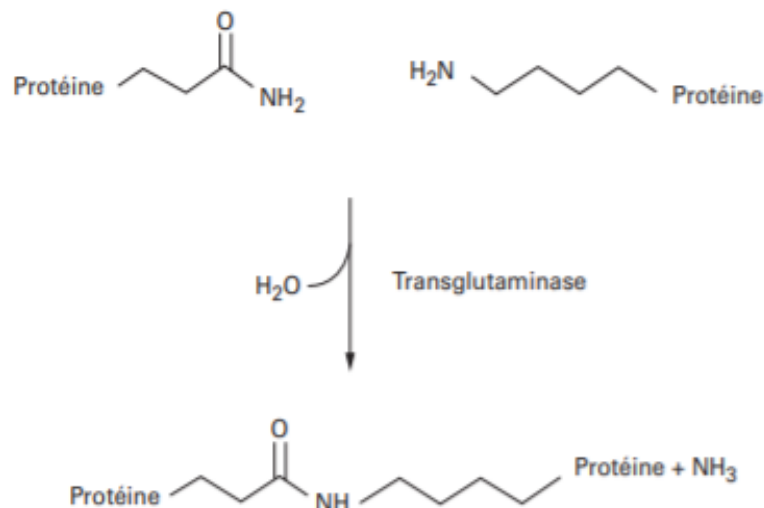


Fig.8: Schéma réactionnel de la formation de liaisons peptidiques entre protéines par la transglutaminase (Spinnler, 2013).

4.3. Les produits de mer

4.3.1. Protéases

Les protéases sont largement utilisées comme outils biotechnologiques dans le développement des produits de la mer, tels que le dépeçage, le décalaminage, la production de caviar, l'attendrissement des calmars, la maturation du poisson salé, la sauce de poisson, etc. En outre, les protéases sont aussi largement étudiées pour le traitement des sous-produits des fruits de mer afin de produire des hydrolysats à partir des sous-produits du traitement des fruits de mer et des fruits de mer sous utilisés et d'en extraire des composants précieux, tels que la saveur des fruits de mer, la chitine, les pigments, les huiles et les graisses, etc. Le rôle des protéases dans le traitement des fruits de mer a été examiné par plusieurs chercheurs (Suresh *et al.*, 2015).

4.3.2. Lipases

Les lipases constituent une vaste famille d'enzymes qui catalysent l'hydrolyse des liaisons ester dans des substrats tels que les triglycérides, les phospholipides, les esters de cholestéryle et les esters de vitamines. Les lipases présentent une spécificité en termes d'acides gras, de nature de l'alcool et de stéréospécificité. La présence, l'isolement, les propriétés et le rôle physiologique des lipases dans les organismes aquatiques ont été discutés. Les applications importantes des lipases dans le traitement des fruits de mer comprennent la modification de la saveur et l'hydrolyse préférentielle des esters éthyliques des AGPI (Venugopal, 2016).

4.3.3. La transglutaminase (TGase)

"Les transglutaminases" (TGA) favorisent les réactions de transfert d'acyle (Fernandes, 2016). Cette enzyme est connue pour contribuer à la gélatinisation des protéines musculaires des poissons **la figure 9** (Jiang, 2000).

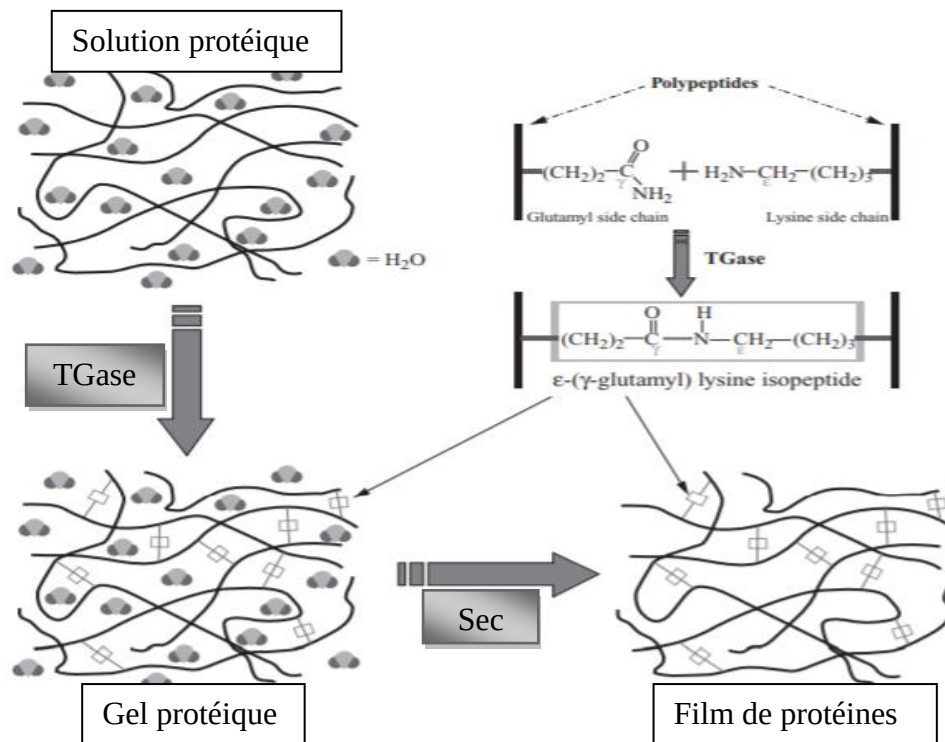


Fig.9: Réticulation des protéines en gel et en film induite par la transglutaminase (Benjakul *et al.*, 2010).

4.4. Usages dans la fabrication de produits céréaliers

4.4.1. Les enzymes dans la fabrication du pain (la panification) :

La boulangerie est un nom commun pour la production de produits de boulangerie, tels que "le pain" (**figure 10**), "les gâteaux", "les pâtisseries", "les biscuits", "les craquelins", "les tartes et les tortillas", où la farine de blé est à la fois l'ingrédient le plus essentiel et la principale source de substrats enzymatiques pour le produit. Les boulangeries sont connues pour une amélioration radicale de leur qualité au cours des dix dernières années en termes de saveur, de texture et de durée de conservation. L'utilisation d'enzymes est le principal facteur de ces améliorations. Parmi les enzymes utilisées dans les applications alimentaires, celles utilisées dans l'industrie de la boulangerie représentent près d'un tiers du marché. Les enzymes de boulangerie sont utilisées comme additifs de la farine et sont utilisées dans les conditionneurs de pâte pour remplacer les ingrédients chimiques et pour remplir d'autres fonctions en respectant l'étiquetage.

L'industrie de la boulangerie utilise principalement cinq types d'enzymes (**tableau 12**). Les amylases sont utilisées pour convertir l'amidon en sucre et produire des dextrines. Les oxydases sont utilisées pour renforcer et blanchir la pâte. Les hémicellulases et les protéases sont les enzymes qui ont un effet sur le gluten du blé. Alors que les hémicellulases améliorent la résistance du gluten, les protéases réduisent son élasticité. L'ensemble de ces enzymes joue un rôle important dans le maintien du volume du pain, de la douceur de la mie, du croustillant

de la croûte, de la coloration ou du brunissement de la croûte et dans le maintien de la fraîcheur (Van Oort, 2010).

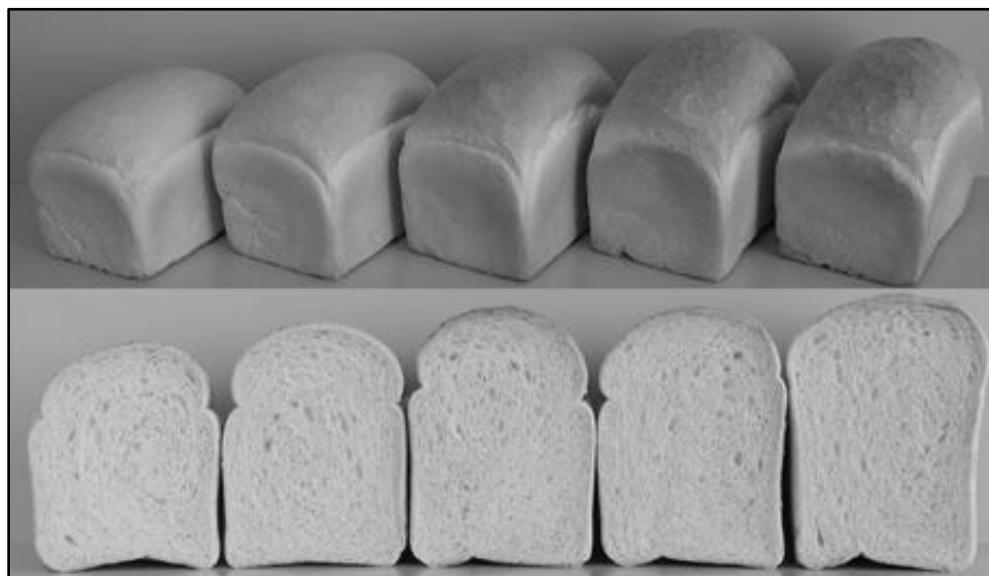


Fig.10: Influence de l'augmentation des doses de fongique-amylase sur la qualité du pain pané. De gauche à droite: Contrôle, 10 unités / kg de farine, 30 unités / kg de farine, 50 unités / kg de farine, 70 unités / kg de farine (Kornbrust *et al.*, 2012).

Tableau 11: Effet général des enzymes dans la panification (Van Oort, 2010).

	Amélioration du réseau de gluten	Rétention de gaz/augmentation du volume	Amélioration de la couleur et de la saveur	Structure de la mie améliorée	Amélioration des propriétés de durée de conservation
Amylase		X	X	X	X
Protéase	X				
Ylanase	X	X		X	
Oxidase	X	X		X	
Lipase	X	X	X	X	

4.4.2. Malterie et brasserie

Le brassage de la bière est un processus très traditionnel, basé sur une enzymologie endogène complexe qui se produit pendant le maltage du grain, le brassage du grist et la fermentation. Les enzymes pertinentes dérivées des céréales (généralement de l'orge ou du blé) qui sont impliquées sont passées en revue. Une série d'enzymes exogènes, telles que les glucanases, l'acétolactocarboxylase et la prolylendopeptidase, sont disponibles pour améliorer le processus de brassage existant **tableau 13**.

La conversion de l'orge en bière se fait en trois étapes primaires de type " réacteur enzymatique ": le grain d'orge, la cuve de moût et la cellule de levure (Bamforth, 2009). Les principales enzymes utilisées dans l'industrie brassicole peuvent être divisées en quatre processus principaux qui sont la germination, le brassage, la fermentation et la clarification. Le processus de brassage comprend principalement neuf étapes générales qui sont le maltage, le broyage, le brassage, le lautrage, l'espérance, la fermentation, le conditionnement, le filtrage et la mise en boîte ou en bouteille (Gomaa, 2018).

Tableau 12: Enzymes de brassage et leurs effets (Gomaa, 2018).

Enzyme	Sources	Processus	Fonction
α-amylase	Endogène dans le grain d'orge. Bacillus licheniformis Bacillus subtilis	Maltage Brassage	Hydrolyse de l'amidon Améliorer la clarification
β-amylase	Endogène dans le grain d'orge. Amande de blé Bacillus licheniformis	Maltage Brassage	Hydrolyse de l'amidon. Améliorer le maltage. Améliorer la saccharification. Augmenter le rendement de la fermentation.
β-glucanase	Endogène dans le grain d'orge. Trichoderma sp. Orpinomyces sp.	Maltage Fermentation du moût	Améliorer le maltage Réduire la viscosité Améliorer la clarification Aide à la production d'une verve claire
α-amylase fongique	Aspergillus sp.	Fermentation	Augmenter le rendement de la fermentation
Protéase	Endogène dans le grain d'orge. Aperguillus sp. Latex d'ananas	Maltage Brassage Stockage	Améliorer le maltage Améliorer la fermentation Amélioration de la clarification Améliorer la qualité de la réfrigération et du stockage.
α-acétolactate décarboxylase	Bacillus subtilis recombinant	Fermentation	Réduire le temps de fermentation
Amyloglucosidase	Aspergillus niger	Mâchage	Augmenter la quantité de glucose dans le moût

4.5. Usages dans les préparations des fruits et légumes

Les transformateurs de fruits et de jus utilisent des enzymes pour une variété d'avantages, notamment : l'augmentation du rendement en jus, l'amélioration de l'efficacité de la filtration du jus, l'amélioration de la stabilité du jus pour la concentration, l'amélioration de la clarté du jus, la réduction de l'amertume du jus et l'augmentation de la vitesse de déshydratation du fruit. Les enzymes les plus souvent utilisées dans le traitement du jus sont la pectinase, la cellulase, l'hémicellulase, l'amylase et l'arabinase **Tableau 14**. La naringinase et la limonase ont été utilisées pour hydrolyser la naringine et la limonine, les composés amers présents dans le jus de pamplemousse. La biomacérase peut être utilisée dans la production de purées stables à partir d'une grande variété de fruits et de légumes, tels que les carottes, les tomates, les pommes de terre, le céleri et les poires. La biopectinase est spécialement formulée pour hydrolyser la pectine, la cellulose et l'hémicellulose de manière plus importante que les produits traditionnels à base de pectinase (James *et al.*, 1996).

Tableau 13: Principales enzymes utilisées dans la transformation des fruits et légumes (Fleuri *et al.*, 2015).

Enzymes	Action	Application technologique
Pectinestérase	Éliminer les groupes méthyle des unités galactose de pectine	Augmente la fermeté des légumes et également utilisé avec la pectinase
Pectinase	Hydrolyse de la pectine	Clarification des jus de fruits
Hémicellulase	Hydrolyse de l'hémicellulose	Utilisé avec la pectinase et la cellulase. Aide à l'extraction des fruits, jus, huiles végétales et composés aromatiques
α-amylase	Aléatoire hydrolyse les bornes α -1,4 pour rompre l'amidon et produire du maltose	Aide à la production de sucre, pour la douceur et augmente le volume de jus de fruits et des légumes

4.5.1. Application des enzymes pectinolytiques

Les enzymes dégradant la pectine sont largement utilisées pour l'extraction et la clarification des jus de fruits (**tableau 15**) et des vins. La clarification enzymatique est influencée par un certain nombre de variables, notamment la concentration de l'enzyme, la température et le temps d'incubation du traitement. Avant la technique de clarification

enzymatique, le collage, la coagulation à chaud, la clarification par congélation étaient quelques unes des méthodes adoptées précédemment pour obtenir des jus clairs.

Les enzymes pectinolytiques commerciales sont utilisées comme auxiliaires technologiques pour la dégradation de la pectine, ce qui permet de fixer les particules organiques en suspension. La pectinase hydrolyse les pectines et provoque la floculation des complexes pectine-protéines. Le jus qui en résulte a une quantité beaucoup plus faible de pectines et une viscosité plus faible, ce qui facilite le processus de filtration ultérieur (Tapre et Jain, 2014). L'utilisation d'enzymes pectiques pour la clarification du vin a été recommandée pour la première fois par Tapre et Jain, 2014. Il est préférable que l'enzyme soit ajoutée au moût lui-même avant la fermentation. Cela permet d'obtenir un meilleur rendement.

Tableau 15: Principales enzymes utilisées dans le traitement des jus de fruits (Fleuri *et al.*, 2015).

Jus de fruits	Enzyme	Application technologique
Jus de pomme	Amylase	Diminue la concentration d'amidon pour améliorer la durabilité.
Jus de banane	Pectinase	Diminue la turbidité et la viscosité.
Jus de cassis	Pectinase, cellulase	Améliorez le rendement en jus.
Jus d'agrumes	et xylanase	Diminue la turbidité du jus.
Jus de cerise	Pectinase et cellulase	Diminue la turbidité et augmente la stabilité.
Café	Pectinase et protéase	Retirer la couche de mucilage des grains de café.
Thé	Pectinase et cellulase	Améliorer le processus de fermentation.
	Pectinase	

4.5.2.L'utilisations d'enzymes dans la fabrication des bonbons et confits

Diverses enzymes hydrolytiques sont utilisées comme auxiliaires technologiques pour la fabrication de bonbons à la crème molle enrobés de chocolat, par exemple les amylases et l'invertase, et pour la récupération de sucres à partir de déchets de bonbons, par exemple les amylases, l'invertase et les protéases. Un mélange de cellulases, d'invertase, de pectinases et de protéases est utilisé dans la fabrication de fruits confits. Les amylases sont également utilisées pour produire des sirops riches en maltose et en glucose destinés à être utilisés comme édulcorant dans la fabrication de bonbons durs, de boissons gazeuses et de caramels. Les lipases sont utilisées pour modifier la matière grasse pour augmenter les saveurs de beurre

dans les bonbons et les caramels et pour réduire également le goût sucré (Simpson *et al.*, 2012).

5.Enzymes et l'additifs alimentaires

5.1.Modification des protéines

La modification des protéines alimentaires à l'aide d'enzymes microbiennes a joué un rôle important dans la fabrication du pain. Un gluten fort et peu extensible réduit le volume du produit cuit. On remédie à cette situation en utilisant des protéinases fongiques pour obtenir une dégradation limitée et spécifique du gluten. L'hydrolyse enzymatique des protéines a été appliquée pour améliorer leur capacité de fouettage ou leur pouvoir émulsifiant. Le développement de procédés industriels d'hydrolyse des protéines a été entravé par la formation de peptides au goût amer. Des exemples de protéines modifiées par des enzymes : Hydrolysats de protéines de soja/Aliments santé (James *et al.*, 1996).

5.2.Les arômes

Les arômes sont les substances responsables des propriétés organoleptiques d'une denrée alimentaire. Ils ne possèdent aucune qualité nutritive, mais jouent cependant un rôle essentiel. Le goût et l'odeur d'une denrée sont les facteurs qui déterminent l'acceptation de celle-ci par un individu et stimulent son appétit. Ils ajoutent en outre un plaisir et une satisfaction mentale indépendante de l'assouvissement de la faim (Fernandez *et al.*, 2002).

Les enzymes permettent de reproduire dans des conditions industrielles les synthèses naturelles des arômes. L'utilisation des enzymes permet d'obtenir des molécules aux caractéristiques très précises. Grâce à la sélectivité des enzymes, il est par exemple possible d'obtenir à l'échelle industrielle un seul des énantiomères d'une molécule avec un très large excès énantiomérique. Suivant les procédés dans lesquels les arômes vont être produits, il sera nécessaire de faire intervenir des enzymes résistantes à la chaleur, à la pression, ou encore qui soient actives à des pH donnés, tout en conservant leur spécificité et leur activité (Montézin *et al.*, 2004).

6.Les enzymes et médicaments alimentaires

Les enzymes peuvent également être utilisées pour améliorer la digestibilité de certains aliments par certaines populations. Ces applications relèvent davantage du secteur de la santé que de celui de l'alimentation. Il est possible par exemple, d'améliorer la digestibilité du lait par les personnes présentant une intolérance au lactose, en dégradant ce lactose au moyen d'une enzyme : la lactase (ou plus précisément la β -galactosidase). Certaines enzymes peuvent être utilisées directement comme médicament, prises par voie orale, associées ou non

avec des aliments. Certaines personnes, incapables d'utiliser les sucres, présentent une intolérance au glucose et à l'amidon ingéré. L'« enzyme-médicament » va hydrolyser ces molécules, permettant leur utilisation normale par l'organisme. On peut ainsi citer l'intolérance congénitale au lactose, due à une déficience en lactase jéjunale qui peut être traitée à l'aide d'une sacrosidase (Montézin *et al.*, 2004).

"CHAPITRE III"

Les enzymes dans la
transformation des
boissons

1. Généralité

L'industrie des boissons est la plus grande industrie de transformation alimentaire, qui fabrique des boissons gazeuses et des boissons alcoolisées. L'industrie des boissons, dont le chiffre d'affaires s'élève à 110 milliards de dollars, est un segment diversifié, représentant des boissons alcoolisées et non alcoolisées qui comprennent le lait, les boissons gazeuses, le café et l'eau en bouteille (Chandrasekaran *et al.*, 2015).

2. Les boissons non alcoolisées

Les boissons énergisantes sont des boissons non alcoolisées qui contiennent principalement de l'eau, quelques vitamines, de la caféine et d'autres substances en fonction du produit (Mekacher et Zouani, 2010).

2.1. Industrie du jus de fruit

L'industrie des boissons aux jus de fruits utilise en particulier des enzymes pour une extraction améliorée du jus et sa clarification. Les enzymes sont des auxiliaires technologiques aidant les transformateurs de fruits à promouvoir les jus de fruits en tant que produits sains et naturels (Nighojkar *et al.*, 2019). L'utilisation d'enzymes dans l'industrie des jus a contribué à augmenter le rendement et la production de divers types de jus (Ribeiro *et al.*, 2010). Lanza *et al.* (1989) ont mentionné la production de jus de fruits et de légumes implique la transformation d'un tissu solide, entier et organisé en un système semi-fluide de cellules et de fragments de parois cellulaires végétales en suspension dans un liquide cellulaire.

Dans la production de jus de fruits et de légumes, les enzymes sont utilisées dans deux buts :

- Dans le traitement de la pulpe broyée : pour augmenter le rendement en jus, pour réduire le temps de traitement, pour améliorer l'extraction de certains composants (arôme et couleur) et pour obtenir la liquéfaction partielle ou totale du tissu végétal (produits homogénéisés, nectars, concentrés de jus et de nectars pulpeux).
- Dans le traitement du jus pour :
 - ✓ Abaisser la viscosité et faciliter une concentration plus ou moins forcée.
 - ✓ Clarifier pour obtenir des jus clairs à concentrer.
 - ✓ Augmenter la vitesse de filtrage lors des traitements de finition des jus clairs.

2.1.1. Les types des enzymes appliquées

Les enzymes industrielles appartiennent à divers groupes, qui sont utilisées dans la transformation des fruits. Le traitement enzymatique du jus de fruits présente de nombreux

avantages par rapport au traitement traditionnel (Ramadan, 2019). Selon Singh. K et Singh. R (2015). Ils sont utilisés pour extraire, clarifier et modifier les jus de nombreux fruits, y compris les baies, les fruits à noyau et les agrumes, les raisins, les pommes, les poires et même les légumes. Il y a tellement d'enzymes utilisées pour clarifier les jus de fruits comprennent "les pectinases, les amylases, les cellulases, la protéase, tannases, l'amyloglucosidase"...etc.

a. Pectinase

Les enzymes "pectinolytiques" sont l'un des groupes importants d'enzymes utilisés dans l'industrie de la transformation des fruits (Tapre et Jain, 2014). La pectine est un polysaccharide de haut poids moléculaire constitué de chaînes linéaires de résidus d'acide D-galacturonique liés en α -1, 4 présents dans la lamelle moyenne de la paroi cellulaire végétale selon **la figure 11**. La présence de substances pectiques est un facteur majeur responsable du trouble dans les jus. L'impact de l'augmentation de la viscosité due à ces substances est une inefficacité de la filtration pendant le traitement du jus. Les enzymes pectiques sont utilisées pour dégrader ces pectines. Elles ont un effet considérable sur l'augmentation du rendement en jus et sur la clarification des jus de fruits. L'hydrolyse des pectines par la pectinase donne lieu à un complexe pectine-protéine qui se floccule ensuite. On obtient ainsi un jus de fruit de moindre viscosité et turbidité (Singh, K et Singh R, 2015).

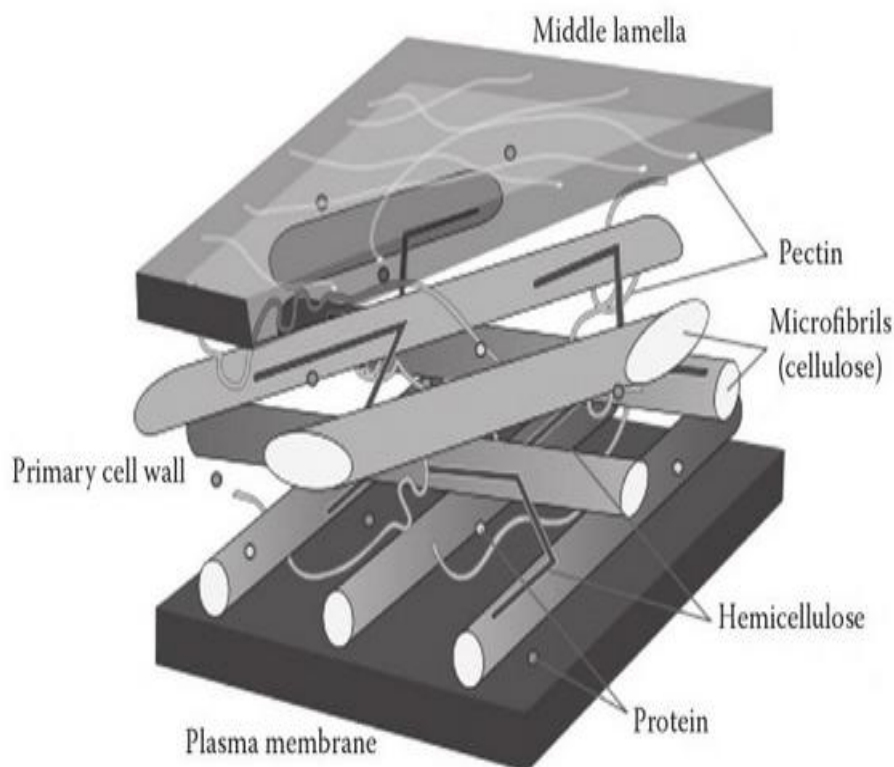


Fig.11: Structure détaillée d'une paroi cellulaire végétale (Rodrigues, 2012).

Selon Ramadan (2019) Les pectinases ont différentes applications technologiques alimentaires :

 L'extraction de jus de fruits

Les pectinases sont utilisées pour faciliter l'extraction de jus de fruits selon **la figure 12** et pour aider à la séparation des flocculant précipités par filtration, sédimentation et / ou centrifugation.

 La clarification de jus de fruits

L'application de pectinases a pour une clarté et un rendement de jus plus élevés ainsi que la préservation des nutriments, de la couleur et de la saveur. Les méthodes de clarification traditionnelles dépendent de l'hydrolyse de la pectine avec des pectinases.

b. Amylases

Les amylases sont largement utilisées dans l'industrie alimentaire transformée, comme la boulangerie, la brasserie, la préparation d'aides digestives, la production de gâteaux, de jus de fruits et de sirops d'amidon. Amylase utilisée pour la clarification des jus de fruits. Les enzymes de macération sont généralement utilisées en deux étapes :

- Après le broyage, pour faire macérer la pulpe du fruit jusqu'à sa liquéfaction partielle ou complète, ce qui non seulement augmente le rendement en jus et réduit le temps de traitement, mais améliore également l'extraction des composants précieux du fruit, et
- Après l'extraction du jus, où les pectinases sont utilisées pour sa clarification, diminuant ainsi la viscosité du jus de fruit avant sa concentration et augmentant le taux de filtration et la stabilité du produit final (Sharma *et al.*, 2014).

Un exemple d'utilisation d'enzymes dans les jus de fruits est présenté dans **la figure 12**.

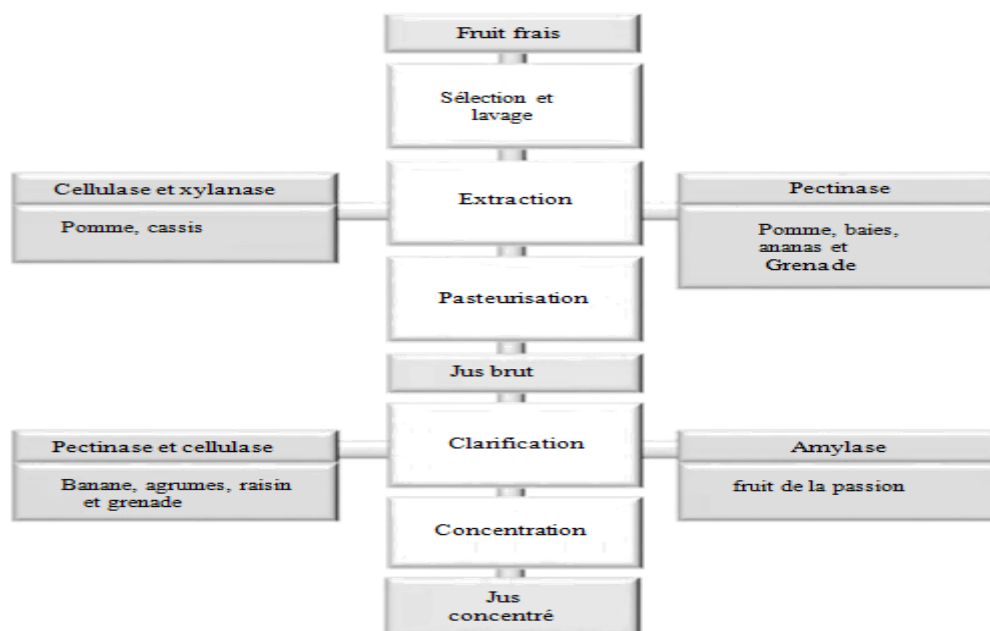


Fig.12: Enzymes ajoutées dans le traitement du jus (Fleuri *et al.*, 2015).

c. Amyloglucosidase

"L'amyloglucosidase" est une enzyme hydrolysant appartenant à la famille des amylases. Il hydrolyse consécutivement les liaisons α -1, 4 glycosidiques des extrémités non réductrices de l'amidon de substrat libérant le glucose comme produit final. Il a également la capacité d'hydrolyser les liaisons α -1, 6 glycosidiques et les liaisons α -1, 3 glycosidiques, mais dans une moindre mesure, aboutissant au même produit final, le glucose (Singh. K et Singh. R, 2015).

d. Cellulase

Les cellulases peuvent accélérer l'élimination de la couleur pendant le traitement des fruits. Ces dernières années, ces enzymes ont trouvé une application réussie dans la liquéfaction "totale" des tissus végétaux pendant le traitement, évitant ainsi le recours à une presse tout en augmentant les rendements (Molina *et al.*, 2016).

Dans l'industrie alimentaire, les cellulases sont utilisées dans l'extraction des constituants du thé vert, des protéines de soja, des huiles essentielles, des produits aromatiques et de l'amidon de patate douce. Associées aux hémicellulases et aux pectinases, elles sont utilisées dans l'extraction et la clarification des jus de fruits. Après le broyage des fruits, les enzymes sont utilisées pour améliorer la liquéfaction par la dégradation de la phase solide. Ces enzymes sont également utilisées dans la fabrication du vinaigre d'orange et dans l'extraction et la clarification des jus d'agrumes. Les cellulases complètent les pectinases dans les industries du jus et du vin en tant que services d'extraction, de clarification et de filtration, avec une augmentation du rendement et de la saveur (Singh *et al.*, 2019).

e. Tannasses

L'acyl hydrolase ou tannasse est une enzyme (EC 3.1.1.20) qui catalyse l'hydrolyse des liaisons esters présentes dans les gallotannins, les ellagitannins, les tannins complexes et les esters d'acide gallique, sans exercer d'effet sur les liaisons carbone-carbone. Ces enzymes sont produites par un certain nombre de champignons, de levures et de bactéries (Chávez-González *et al.*, 2018).

Les tannassesont des applications intéressantes et utiles dans les industries de l'alimentation humaine et animale. Les principales applications des tannasses sont le thé instantané, ainsi que la fabrication d'acide gallique à partir de matières premières végétales riches en tannins. Les tannasses aident à réduire les impacts négatifs des tannins dans les jus de fruits et les boissons. Le traitement enzymatique du jus de fruit afin de réduire l'amertume du jus de fruit présente des avantages tels que la haute qualité du jus de fruit en raison de la non-détérioration et du faible trouble (Ramadan, 2019).

2.1.2. Application des enzymes dans la clarification des jus de fruits

L'application des enzymes dépend du type de polysaccharides présents dans les différents jus de fruits. La pectine est l'obstacle majeur dans les jus d'agrumes ainsi que dans le jus de pomme. La pectinase joue un rôle majeur dans la clarification à cette condition. Alors que l'amylase est préférée lorsque les difficultés sont rencontrées en raison de la présence d'amidon. Parfois, ces enzymes sont utilisées en combinaison avec la cellulose et l'hémicellulase pour réduire efficacement le trouble dans les jus. L'incorporation d'enzymes dans le traitement des jus de fruits s'est avérée être une méthode rentable et efficace. Jusqu'à présent, elles ont été appliquées dans de nombreux jus de fruits (Singh. K et Singh. R, 2015).

2.1.3. Production de jus de fruits

Le processus traditionnel pour obtenir du jus comprend plusieurs étapes depuis le moment où le fruit est récolté, jusqu'au moment où le jus est emballé, y compris "le lavage, le pelage ou la pasteurisation". Un schéma général de ce processus est présenté dans **la figure 13**. Mais ce procédé traditionnel peut être modifié par l'utilisation de plusieurs enzymes (utilisées seules ou en combinaison), dans le but soit d'augmenter le rendement du procédé, de faciliter les opérations en aval, soit même de modifier les propriétés finales du produit en dégrader la matrice cellulaire du tissu végétal (García, 2018).

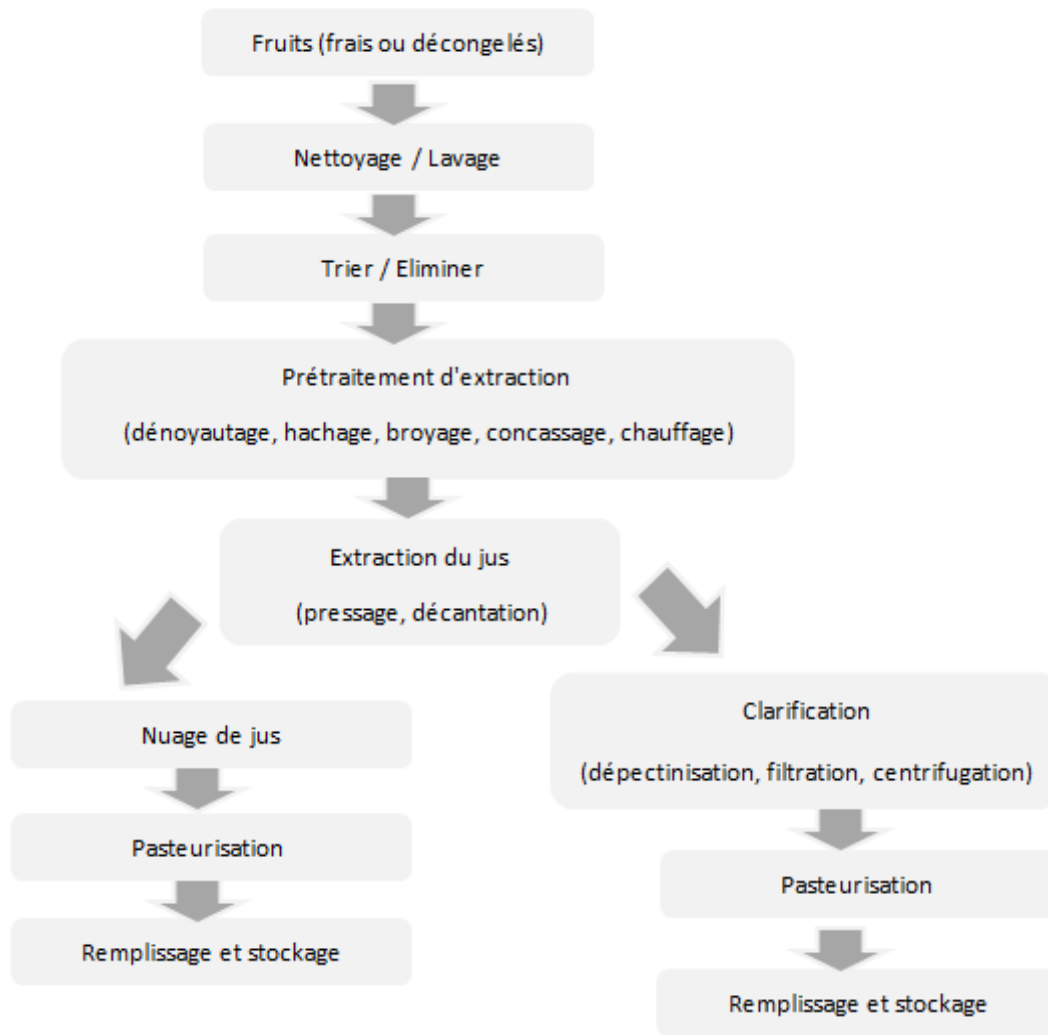


Fig.13 : Organigramme général d'extraction de jus (García, 2018).

❖ *Les étapes de fabrication*

Selon Braesco *et al.* (2013). Quel que soit le produit final (jus de n'importe fruits), les fruits suivent toujours les mêmes étapes de production :

✚ *Sélection, lavage et calibrage :*

Les fruits sont réceptionnés et sélectionnés à l'entrée de la ligne de pressurage. Ils sont ensuite automatiquement lavés et calibrés, puis dirigés vers des extracteurs ou des broyeurs adaptés à leur taille.

✚ *Extraction du jus :*

Le jus est extrait par pressurage mécanique ou broyage selon le type de fruits, ce qui permet une meilleure "extraction" du jus, et une purée est obtenue. Ensuite, la purée est chauffée.

✚ *Macération :*

Une fois la purée stabilisée, l'étape de "macération" commence; c'est l'étape où l'enzyme ou une combinaison d'enzymes est ajoutée. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque les

enzymes sont uniformément réparties dans le moût, par conséquent, une légère agitation est appliquée à ce stade.

Clarification, centrifugation et filtration :

Une fois le jus extrait, une étape de "clarification" est effectuée. Si la couche superficielle de pectine est dégradée par la pectinase. En conséquence, les particules de nuages deviennent plus grosses et un processus de "précipitation" commence. Le processus de "décantation" peut être accéléré avec l'aide de la "centrifugation", de la "filtration" ou de l'ajout de "clarifications" (floculants), ce qui améliore le processus de clarification. À la suite de ce processus, un jus transparent est obtenu, ce qui n'implique pas nécessairement un jus clair, une filtration supplémentaire peut donc être nécessaire pour atteindre le niveau de clarté exigé par le consommateur.

Conditionnement:

L'emballage joue un rôle essentiel dans la protection et la conservation du produit. Il protège de l'oxydation, des microbes, de la chaleur, de la lumière. Il facilite également le transport, l'échange et le stockage.

2.2. Autres produits des industries des boissons non alcoolisées

2.2.1. Lait

Les producteurs laitiers utilisent différentes enzymes, telles que la protéase pour réduire les propriétés allergiques des produits laitiers bovins et la lipase pour améliorer la saveur du fromage. Les enzymes mineures dans les produits laitiers sont nécessaires pour une meilleure production des produits laitiers et pour l'avenir de la technologie laitière. Les enzymes laitières sont utilisées pour la transformation du cheddar, du yogourt, du lait et des produits laitiers. Les propriétés de ces enzymes changent largement du coagulant, de l'utilisation dans la fabrication du fromage, des enzymes bioprotectrices pour améliorer les aspects de la durée de conservation de la transformation des produits laitiers. La présure est utilisée pour le caillage du lait comme phase principale de la technologie de transformation du fromage. Des protéases de différents types sont utilisées pour accélérer le vieillissement du fromage (Mir Khan et Selamoglu, 2020).

2.2.2. Thé

"Le thé" est l'un des moins chers et des plus consommés boissons aromatiques. Il est transformé à partir des pousses tendres du "théier", constituées de deux ou trois feuilles et d'un bourgeon apical non ouvert. En fonction du degré de fermentation, le thé peut être classé comme thé "noir", "vert", "blanc" (Jolvis Pou, 2016).

"Le thé vert" est une boisson largement consommée dans le monde. Le rôle des

enzymes dans la transformation du thé est reconnu depuis près de quatre décennies, de même que son application pour améliorer la qualité du thé. La capacité antioxydante du thé vert dépend en grande partie de la concentration et de la composition des catéchines monomères (MC). L'application d'enzymes à différentes étapes du traitement affectera la concentration ainsi que la composition de MC dans la boisson, ayant ainsi un impact direct sur la capacité antioxydante de la boisson (Murugesh et Subramanian, 2014). Selon Murugesh et Subramanian (2014). Des traitements enzymatiques ont été administrés à trois étapes de la transformation du thé vert. Ces traitements visent à améliorer le rendement en solides solubles, l'extraction / solubilité à l'eau froide, la clarté, la saveur et l'odeur, ainsi qu'à réduire la formation de crème de thé et l'astringence / amertume.

2.2.3.Café

Afin d'améliorer l'arôme et de réduire l'amertume du café torréfié et moulu, les auteurs ont présenté un procédé de traitement des grains de café verts ou partiellement torréfiés avec des enzymes. Les grains de café verts ou partiellement torréfiés sont traités avec une solution contenant des enzymes digérant la paroi cellulaire, des enzymes digérant les composants de stockage des cellules ou des enzymes phénol oxydase sous une pression d'au moins environ 250 psi, puis ils sont séchés et torréfiés (Molina *et al.*, 2016).

Les pectinases jouent un rôle important dans la fermentation du café. La fermentation du café à l'aide de microorganismes pectinolytiques est effectuée pour éliminer la couche de mucilage des grains de café. L'étape de fermentation du traitement du café est accélérée et réduite de 40 à 80 h à environ 20 h par traitement enzymatique. Étant donné que le traitement à grande échelle du café avec des pectinases commerciales est coûteux et non rentable, le mucilage de déchets inoculé est utilisé comme source d'enzymes pectiques microbiennes. Le liquide de fermentation est lavé, filtré puis pulvérisé sur les grains (Kashyap *et al.*, 2001).

Conclusions générales

Les enzymes sont des protéines qui catalysent les réactions biochimiques. Aujourd'hui, les enzymes sont utilisées dans un large éventail d'industries alimentaires où elles améliorent la transformation et / ou la qualité des produits finis. La perception sensorielle de la texture, l'arôme, la saveur...etc. joue un rôle important dans différents types d'aliments, par exemple la boulangerie, la viande et les produits laitiers...etc. L'importance de la texture des aliments s'est encore accrue avec la tendance vers les produits «naturels» sans additifs. Les enzymes fournissent des moyens spécifiques et naturels pour adapter la structure des aliments. Grâce à l'utilisation d'enzymes, il sera possible de transformer des composants alimentaires intrinsèquement disponibles en ingrédients fonctionnels pendant la transformation et la fabrication des aliments.

Parmi les divers secteurs alimentaires, "le lait" est une industrie importante car les produits laitiers sont populaires et courants (le fromage, le yogourt...etc.) dans le monde entier. La consommation par habitant de produits laitiers augmente d'année en année. La production et l'amélioration de la qualité du lait et des produits laitiers font intervenir diverses enzymes (chymosine, lactase, lipase...etc.). En fromagerie, l'ajoute des enzymes provoquer la coagulation du lait qui est impérative pour la production de fromage. L'utilisation d'enzymes dans le secteur laitier connaît une augmentation rapide de jour en jour pour une variété d'applications.

"La viande" et ses produits sont très consommés dans le monde entier, et la tendreté est la principale caractéristique considérée par les consommateurs. L'utilisation d'enzymes dans la technologie de la viande se développe et promet des avantages souhaitables en termes de coûts et la qualité du produit final. En d'autre part, les industries du "poisson et des fruits de mer" jouent un rôle clé en tant que fournisseurs d'aliments sains. Compte tenu de la nature périssable des produits et de leur complexité, leur traitement et leur contrôle efficaces sont une tâche difficile. Dans ce cadre, la technologie enzymatique peut contribuer au contrôle de la qualité des produits de la pêche et des fruits de mer.

La consommation de jus de fruits/légumes et autres produits naturels comme alternative aux boissons gazeuses non alcoolisées. Parallèlement à l'augmentation de la consommation, il y a eu une augmentation parallèle de la demande de jus de fruits de variété, des enzymes sont utilisées efficacement dans l'industrie de transformation des fruits. Ces enzymes sont utilisées pour une variété de processus de fabrication partout où des matières végétales sont impliquées. Le traitement enzymatique rend le jus non seulement clair, mais

également en éliminant les changements indésirables de couleur, de texture, de stabilité. L'utilisation d'enzymes dans l'industrie des jus a contribué à augmenter le rendement et la production de divers types de jus.

En boulangerie, ces produits comprennent le pain, les petits pains, les gâteaux, les biscuits...etc. L'utilisation d'enzymes permet le remplacement des additifs chimiques. Leur utilisation en boulangerie se développe, offrant des solutions flexibles et performantes qui optimisent la fonctionnalité de la farine, stabilisent les paramètres de transformation et assurent ou améliorent la qualité de la pâte et la produit de boulangerie final. Les effets pouvant être obtenus en utilisant des enzymes sont une durée de conservation prolongée, une meilleure fermentation de la pâte, une usinabilité de la pâte. Les enzymes sont un outil très puissant pour répondre à ces tendances et les propriétés des enzymes sont constamment améliorées pour répondre aux besoins de l'industrie de la boulangerie.

"Références bibliographiques"



Ako, H., & Nip, W. K. (2006). Enzyme classification and nomenclature. *Food biochemistry and food processing*, 135-144.

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

Bamforth, C. W. (2009). Current perspectives on the role of enzymes in brewing. *Journal of Cereal Science*, 50(3), 353-357.

Bekhit, A. A., Hopkins, D. L., Geesink, G., Bekhit, A. A., & Franks, P. (2014). Exogenous proteases for meat tenderization. *Critical reviews in food science and nutrition*, 54(8), 1012-1031.

Benjakul, S., Klomklao, S., & Simpson, B. K. (2010). 10 Enzymes in fish processing. *Enzymes in food technology*, 211.

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

Binod, P., Papamichael, E., Varjani, S., & Sindhu, R. (2019). Introduction to green bioprocesses: Industrial enzymes for food applications. In *Green Bio-processes* (pp. 1-8). Springer, Singapore.

Bommarius, A. S., & Riebel-Bommarius, B. R. (2004). *Biocatalysis: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.

Boukahili, A. B., Chachoua, H., & Hamames, M. (2020). Caractéristiques des actinomycètes et de certains de leurs métabolites bioactifs (antibiotiques et enzymes).

Braesco, V., Gauthier, T., & Bellisle, F. (2013). Jus de fruits et nectars. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 48(5), 248-256.

Buchert, J., Selinheimo, E., Kruus, K., Mattinen, M. L., Lantto, R., & Autio, K. (2007). Using crosslinking enzymes to improve textural and other properties of food. In *Novel enzyme technology for food applications* (pp. 101-139). Woodhead Publishing.

Cazarin, C. B. B., Lima, G. C., da Silva, J. K., & Maróstica, M. R. (2015). Enzymes in meat processing. *Enzymes in food and beverage processing*. CRC, Boca Raton, 337-351.

Chandrasekaran, M., Basheer, S. M., Chellappan, S., Krishna, J. G., & Beena, P. S. (2015). Enzymes in food and beverage production: an overview. *Enzymes in food and beverage processing*. CRC, Boca Raton, FL, 117-137.

Chávez-González, M. L., Rodríguez-Duran, L. V., Buenrostro-Figueroa, J. J., Sepúlveda-Torre, L., Ascacio-Valdés, J. A., Rodríguez-Herrera, R., & Aguilar, C. N. (2018). Tannin

Degrading enzymes: catalytic properties and technological perspectives. In *Enzymes in Food Technology* (pp. 125-141). Springer, Singapore.

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

Fernandes, P. (2016). Enzymes in fish and seafood processing. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 4, 59.

Fernandez, X., Kerverdo, S., Duñach, E., &Lizzani-Cuvelier, L. (2002). Les hétérocycles dans la chimie des arômes. *Actualité Chimique*, (4), 4-14.

Fleischmann, A., Darsow, M., Degtyarenko, K., Fleischmann, W., Boyce, S., Axelsen, K. B., ...&Apweiler, R. (2004). IntEnz, the integrated relational enzyme database. *Nucleic acids research*, 32(suppl_1), D434-D437.

Fleuri, L. F., Delgado, C. H. O., Novelli, P. K., Pivetta, M. R., Prado, D. Z., & Simon, J. W. (2015). Enzymes in fruit juice and vegetable processing. *Enzymes in food and beverage processing*, 255-280.

Fraatz, M. A., Rühl, M., & Zorn, H. (2013). Food and feed enzymes. *Biotechnology of Food and Feed Additives*, 229-256.

García, C. Á. (2018). Application of enzymes for fruit juice processing. In *Fruit Juices* (pp. 201-216). Academic Press.

Gomaa, A. M. (2018). Application of enzymes in brewing. *J. Nutr. Food Sci. Forecast*, 1(5).

James, J., Simpson, B. K., & Marshall, M. R. (1996). Application of enzymes in food processing. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 36(5), 437-463.

Jiang, S. T. (2000). Enzymes and their effects on seafood texture. *Seafood enzyme: Utilization and influence on postharvest seafood quality*, 411-450.

JolvisPou, K. R. (2016). Fermentation: The key step in the processing of black tea. *Journal of Biosystems Engineering*, 41(2), 85-92.

Kashyap, D. R., Vohra, P. K., Chopra, S., &Tewari, R. (2001). Applications of pectinases in the commercial sector: a review. *Bioresource technology*, 77(3), 215-227.

Kornbrust, B. A., Forman, T., &Matveeva, I. (2012). Applications of enzymes in breadmaking. In *Breadmaking* (pp. 470-498). Woodhead Publishing.

Lanzarini, G., &Pifferi, P. G. (1989). Enzymes in the fruit juice industry. In *Biotechnology applications in beverage production* (pp. 189-222). Springer, Dordrecht.

Le diplome, d. M. (2007). Memoire de magister(doctoral dissertation, université d'oran).

- Lefèvre, F., Ravot, G., Nguyen, H. K., Lagarde, D., Fourage, L., Sonet, J. M., & Dupret, D. (2002). Découverte et optimisation de nouvelles enzymes pour la catalyse enzymatique industrielle. *Actualité chimique*, (8/9), 27-30.
- Linden, G. (1998). Transformation des produits alimentaires par les enzymes. Ed. Techniques Ingénieur.
- Maróstica, M. R., & Pastore, G. M. (2010). Some nutritional, technological and environmental advances in the use of enzymes in meat products. *Enzyme research*, 2010.
- Mekacher, L. R., & Zouani, A. (2010). Boissons énergisantes: Consommation dans le milieu footballistique algérien. *Revue CAMPUS*, (17), 13-16.
- Mir Khan, U., & Selamoglu, Z. (2020). Use of Enzymes in Dairy Industry: A Review of Current Progress. *Archives of Razi Institute*, 75(1), 131-136.
- Molina, G., Contesini, F. J., Sato, H. H., & Pastore, G. M. (2016). Enzymes in beverage processing. *Enzymes in food and beverage processing*, 281-303.
- Montézin, M., Sonet, J. M., & Dupret, D. (2004). Enzymes de l'extrême et alimentation: Application des propriétés enzymatiques spécifiques aux procédés alimentaires. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 39(6), 391-396.
- Murugesh, C. S., & Subramanian, R. (2014). Applications of Enzymes in Processing Green Tea Beverages: Impact on Antioxidants. In *Processing and Impact on Antioxidants in Beverages* (pp. 99-108). Academic Press.
- Nighojkar, A., Patidar, M. K., & Nighojkar, S. (2019). Pectinases: production and applications for fruit juice beverages. In *Processing and Sustainability of Beverages* (pp. 235-273). Woodhead Publishing.
- Polaina, J., & MacCabe, A. P. (2007). *Industrial enzymes* (pp. 531-547). Netherlands: Springer.
- Ramadan, M. F. (2019). Enzymes in fruit juice processing. In *Enzymes in food biotechnology* (pp. 45-59). Academic Press.
- Ribeiro, D. S., Henrique, S. M., Oliveira, L. S., Macedo, G. A., & Fleuri, L. F. (2010). Enzymes in juice processing: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(4), 635-641.
- Rodrigues, S. (2012). Enzyme maceration. *Advances in fruit processing technologies*, 235-246.
- Samah, B. (2010). Immobilisation de la lipase de *Candida rugosa* sur la résine Amberjet 4200Cl Optimisation de l'énantioselectivité par la méthode des surfaces de réponse.

Sanromán, M. A., & Deive, F. J. (2017). Food Enzymes. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 119-142). Elsevier.

Schäfer, T., Borchert, T. W., Nielsen, V. S., Skagerlind, P., Gibson, K., Wenger, K., ...& Xu, H. (2006). Industrial enzymes. *White biotechnology*, 59-131.

Schuster, S. C. (2008). Next-generation sequencing transforms today's biology. *Nature methods*, 5(1), 16-18.

Sharma, H. P., Patel, H., & Sharma, S. (2014). Enzymatic extraction and clarification of juice from various fruits—a review. *Trends Post Harvest Technol*, 2(1), 01-14.

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

Singh, K., & Singh, R. K. (2015). Role of Enzymes in Fruit juices Clarification during Processing: A review. *Int J Biol Technology*, 6, 114-124

Singh, R., Singh, A., & Sachan, S. (2019). Enzymes used in the food industry: Friends or foes?. In *Enzymes in food biotechnology* (pp. 827-843). Academic Press.

Spinnler, H. E. (2013). Enzymes d'intérêt pour la fabrication d'aliments. *Techniques de l'Ingenieur*, bio650.

Subin, S. R., & Bhat, S. G. (2016). Enzymes: concepts, nomenclature, mechanism of action and kinetics, characteristics and sources of food-grade enzymes. *Enzymes in food and beverage processing*, 3-38.

Suresh, P. V., Nidheesh, T., & Pal, G. K. (2015). Enzymes in seafood processing. *Enzymes in food and beverage processing*, 354-377.

Tapre, A. R., & Jain, R. K. (2014). Pectinases: Enzymes for fruit processing industry. *International Food Research Journal*, 21(2).

TOURRASSE, O. (2005). Construction et utilisation d'une banque d'ADN génomique pour la recherche de gènes d'intérêt industriel chez *Penicillium funiculosum* par analyse transcriptomique différentielle (Doctoral dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse).

Van Oort, M. (2010). Enzymes in bread making. *Enzymes in food technology*, 103.

vanOort, M. (2010). Enzymes in food technology—introduction. *Enzymes in food technology*, 2.

Venugopal, V. (2016). Enzymes from seafood processing waste and their applications in seafood processing. *Advances in food and nutrition research*, 78, 47-69.

Whitehurst, R. J., & Van Oort, M. (Eds.). (2010). *Enzymes in food technology* (Vol. 388). Chichester: Wiley-Blackwell.

Yushkova, E. D., Nazarova, E. A., Matyuhina, A. V., Noskova, A. O., Shavronskaya, D. O., Vinogradov, V. V., ... & Krivoschapkina, E. F. (2019). Application of immobilized enzymes in food industry. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(42), 11553-11567.