



Mémoire Master Académique

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Présenté par :

MOUSSA Ilham

Et

SAADAOUI Sarra

Thème

**APPORT DE LA FERMENTATION A LA FONCTIONNALITE DES
ALIMENTS :
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

Devant le jury :

Présidente :	Mr. GOUBI M.	MAA	Université de Khenchela
Encadrante :	Dr. MERABTI R.	MCA	Université de Khenchela
Examinatrice :	Dr. LELMI N.	MCA	Université de Khenchela

Année : 2022/2023

Remerciements

Louanges à Allah Qui nous a donné de la force et nous a aidés à terminer cette recherche et à la réaliser de cette excellente manière. Hier, nous avons commencé notre voyage et nous voici aujourd'hui le jour de notre remise des diplômes.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre gratitude à l'enseignante responsable, **MERABTI RYMA**, pour sa supervision de ce travail et pour nous avoir fourni tous les précieux conseils, alors que Dieu la récompense de toute sa bonté nous remercions également tous ceux qui nous ont tendu la main de près ou de loin.

Nous remercions également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail ; Dr. LEULMI Nassima et Mr. GOUBI Mostafa.

Un grand merci à tous les enseignants de la spécialité microbiologie appliquée à l'université de Khenchela.

En fin, nous ne pouvons que prier Dieu Tout-Puissant de nous accorder la justice, la chasteté et la richesse, et de faire de nous des guides guidés.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

A mes très chers **parents**

Qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et me donner Courage de terminer mes études.

A mes chères **sœurs**

A mon chère petit frère **ELMOUATASSIM BILLAH**

Pour votre soutien et vos encouragements dans la réalisation de ce travail

A mon binôme **Sarra**

Qui a partagé avec moi tous les moments difficiles pour accomplir ce travail.

A toute ma famille

Ilham

Dédicace

Je remercie Allah qui m'a accordé la grâce de la raison et de la religion.

À tous ceux qui ont prononcé la parole du monothéisme avec sa langue et y ont cru dans son cœur À
tous ceux qui ont prié pour le meilleur de la création Muhammad paix soit sur lui.

Je dédie ma graduation à tous ceux qui ont allumé la première bougie qui a éclairé le chemin
pour moi dans la vie, ma mère et mon père, que Allah les protège et fasse d'eux une couronne au-
dessus de ma tête. A mon père, le vrai sens de la virilité, à celui qui m'a appris bien des sens à la vie,
à ma mère, source de tendresse, aux pieds de laquelle Allah a fait le paradis, et Allah m'en a honoré,
ma chère mère, le don de Allah pour moi, merci de m'avoir soutenu pendant toutes ces années et
d'avoir toujours cru en moi.

À toute ma généreuse famille qui m'a soutenu et qui sont toujours frères et sœurs,

À mon ami Ilham

À tous ceux qui ont marqué ma vie et à tous ceux qui me sont chers

Sarra

TABLE DES MATIERES

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Résumé

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 01	4
MATRICES ALIMENTAIRES ET FERMENTATION	4
1 Les matrices alimentaires	5
2 Classification et caractéristique des matrices alimentaires	5
2.1 Classification des matrices alimentaires	5
2.2 Caractéristique des matrices alimentaires	6
2.2.1 Masse volumique et densité	6
2.2.2 Teneur en eau, diffusivité, migration	7
2.2.3 Rhéologie et propriétés mécaniques	7
3 Relation matrices alimentaires et fermentation	7
3.1 Importance de la fermentation	8
4 Les types de fermentation	8
4.1 La fermentation lactique	9
4.2 La fermentation alcoolique	9
4.3 La fermentation acétique	9
4.4 La fermentation malolactique (FML)	10
4.5 La fermentation propionique	10
5 Les aliments fermentés	10
5.1 Définition	10
5.2 Classification	12
5.2.1 Les produit laitiers	12

5.2.1.1 Lait fermenté	12
5.2.1.2 Le fromage	12
5.2.1.3 Le yaourt	12
5.2.2 Les céréales fermentée	13
5.2.3 Les végétaux fermentés	14
5.2.4 Les viandes fermentées	14
CHAPITRE 02 :	16
MICROBIOTE DES ALIMENTS FERMENTES	16
1 Le microbiote des matrices alimentaires	17
1.1 Définition du microbiote	17
1.2 Microbiote des matrices fermentées	17
2 Les microorganismes impliqués dans la fermentation des matrices alimentaires	17
2.1 Les bactéries lactiques (BL)	17
2.2 Les levures	20
2.3 Les bactéries propioniques	21
2.4 Les bactéries acétiques	21
3 Le rôle des microorganismes dans la fermentation des matrices alimentaires	22
CHAPITRE 03	24
IMPACT DE LA FERMENTATION SUR LA FONCTIONNALITÉ DES MATRICES ALIMENTAIRES	24
1 Aliments fonctionnels	25
2 Polyphénols dans les aliments fermentés et leurs avantages et potentiels pour la santé	25
2.1 Définition des polyphénols	25
2.2 Fermentation des matrices alimentaires et biodisponibilité des polyphénols	25
2.3 Polyphénols et fermentation	25
3 Peptides bioactifs et aliments fermentés : production et fonctionnalité	26
3.1 Les aliments riches en protéines comme source de peptides bioactifs	26

3.2 Avantages pour la santé des peptides bioactifs dans aliments fermentés	26
3.2.1 Produits laitiers fermentés	27
3.2.2 Légumineuses fermentées	28
3.2.3 Poissons et de viandes fermentés	28
4 Enzymes fibrinolytiques dans les produits alimentaires fermentés et prévention des maladies cardiovasculaires	29
5 Les EPS des aliments fermentés et leur potentiel santé	30
5.1 EPS : Synthèse et production par les micro-organismes	31
5.2 EPS et avantages pour la santé	34
5.2.1 Activité prébiotique	34
5.2.2 Modulation du système immunitaire	34
5.2.3 Activité antioxydante	34
5.2.4 Activité antitumorale	34
5.2.5 Activité hypocholestérolémiant	34
6 Impact de la fermentation sur les facteurs antinutritionnels	35
7 Prébiotiques, probiotiques et symbiotiques : une nouvelle approche intégrée dans les aliments fonctionnels	35
7. 1 Prébiotiques, probiotiques et postbiotiques	35
7. 2 Symbiotiques	36
CONCLUSION GENERALE	38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	41

LISTE DES ABREVIATIONS

BL	Les bactéries lactiques
FML	La fermentation malolactique
EPS	Exopolysaccharides
ECA	Enzyme de conversion l'Angiotensine
FAO	Food and Agriculture Organization

LISTE DES TABLEAU

Tableau 1 : Principales classes de produits fermentés, matières premières utilisées, microorganismes réalisant la fermentation, ainsi que lieu majeur de production et de consommation (Savary-Auzeloux et Rul, 2021).....	11
Tableau 2 : Aliments et boisson traditionnels, à base de céréales fermentées, consommés dans différentes régions du monde (Guyot, 2010).	13
Tableau 3 : Exemples BL utilisées dans la fermentation des aliments (Drouault et Corthier, 2001).	18
Tableau 4 : Bactéries de l'acide acétique impliquées dans les fermentations spontanées (Paramithiotis, 2021).....	21
Tableau 5 : Fermentation alimentaire et effet des polyphénols.....	26
Tableau 6 : Aliments fermentés, peptides bioactifs et leurs avantages spécifiques pour la santé.....	28
Tableau 7 : Principaux EPS microbiens et leurs producteurs (Celligoi et al., 2021).....	31
Tableau 8 : EPS dans les aliments fermentés	32
Tableau 9 : Utilisation de symbiotiques pour le traitement de différentes maladies (Lugani et al.,2021).	36

LISTE DES FIGURE

Figure 1: BL sous forme de bacilles arrondies (A), de bacilles (B) ou de coques (C), colorées au bleu de méthylène (Fessard, 2017).....	18
Figure 2 : Types de fermentation et production de peptides bioactifs (Samurailatpam et al., 2021).	27
Figure 3: Impact de la fermentation sur les matières végétales (Kahala, 2021).....	35

Résumé

Les matrices alimentaires sont des supports complexes constitués de différents composants alimentaires qui présentent plusieurs caractéristiques. Le moyen de conservation utilisé depuis des milliers d'années des matrices alimentaires est la fermentation par l'utilisation de nombreux microorganismes peut influencer la biodisponibilité des nutriments et les propriétés physiques, chimiques et sensorielles des aliments tels que l'ajout de nouveaux goûts, arômes, saveurs et textures. Elle permet l'amélioration également de la valeur nutritionnelle des aliments.

La fonction des aliments fermentés est de fournir des avantages pour la santé au-delà de la fourniture d'aliments de base et parmi ses avantages ; l'activité antitumorale, l'activité antioxydante, l'inhibition de l'activité lipoxigénase, inhibition ou l'abaissement de l'hypertension, la gestion des maladies cardiaques et la réduction des maladies coronariennes. L'étude des matrices fermentées, la caractérisation des microbiotes fermentaire et de leur interaction représentent une source importante d'innovation pour accompagner les transitions vers une alimentation durable plus sûre, plus saine et fonctionnelle.

Les mots clés : Fermentation, Matrices Alimentaires, Microbiote, Fonctionnalité, Santé.

المخلص

المصفوفات الغذائية عبارة عن مواد معقدة تتكون من مكونات غذائية مختلفة لها العديد من الخصائص. إن وسيلة الحفظ المستخدمة لآلاف السنين من مصفوفات الطعام هي التخمر عن طريق استخدام العديد من الكائنات الحية الدقيقة التي يمكن أن تؤثر على التوافر البيولوجي للمغذيات والخصائص الفيزيائية والكيميائية والحسية للأغذية مثل إضافة مذاقات وروائح ونكهات وقوام جديدة. كما أنه يحسن القيمة الغذائية للطعام.

تتمثل وظيفة الأطعمة المخمرة في توفير فوائد صحية تتجاوز توفير الأطعمة الأساسية ومن بين فوائدها مثل النشاط المضاد للأكسدة النشاط المضاد للأكسدة، وتنشيط نشاط ليبوكسيناز، وتنشيط أو خفض ضغط الدم، وإدارة أمراض القلب والحد من أمراض القلب التاجية. تمثل دراسة المصفوفات المخمرة وتوصيف الجراثيم المخمرة وتفاعلاتها مصدرًا مهمًا للابتكار لدعم التحولات نحو غذاء مستدام أكثر أمانًا وصحة وفعالية.

الكلمات المفتاحية: التخمر، المصفوفات الغذائية، الميكرو بيوتا، الوظيفة، الصحة.

Summary

Food matrices are complex carriers made up of different food components that have several characteristics. The means of preservation used for thousands of years of food matrices is fermentation by the use of many microorganisms can influence the bioavailability of nutrients and the physical, chemical and sensory properties of food such as adding new tastes, aromas, flavors and textures. It also improves the nutritional value of food.

The function of Fermented foods is to provide health benefits beyond the provision of stable foods and among its benefits like antitumor activity antioxidant activity, inhibition of lipoxygenase activity, inhibit or lower hypertension, management heart disease and reduction of coronary heart disease, the study of Fermented matrices, the characterization of fermentative microbiota and their interactions represent an important source of innovation to support transitions towards safer, healthier and more functional. sustainable food.

Keywords: Fermentation, Food matrices, Microbiota, Functionality, Health.

INTRODUCTION GENERALE

Depuis le début de l'histoire, l'homme produisait du pain et des boissons fermentées. Cependant, ce phénomène ne représentait pour lui qu'un simple acte de magie sans toutefois comprendre les mécanismes derrière. Ce n'est qu'au milieu du XIX^{ème} siècle que le rôle des levures dans la fermentation alcoolique a été bien établi. Anciennement, le terme fermentation (fervere du Latin) décrivait le simple phénomène d'ébullition observé suite à l'apparition des bulles de CO₂. Jusqu'à lors aucune relation entre les levures et la fermentation alcoolique n'a été établie. L'étude chimique de la fermentation a commencée par la suite avec Lavoisier et a été poursuivie par Gay-Lussac dans le siècle suivant. La définition exacte de la fermentation n'a été cependant reçue qu'avec Pasteur qui démontra qu'un microorganisme est responsable des réactions chimiques qui ont lieu durant la fermentation (**Al Daccache, 2019**).

La fermentation est une méthode de préservation des aliments et de diversification de la diète, aussi ancestrale que le salage et le séchage. Elle résulte de l'action spontanée ou dirigée de communautés microbiennes endogènes, et/ou ajoutées, sur des matières premières extrêmement diverses, d'origine animale ou végétale. Les aliments résultants de ce procédé de fermentation sont profondément modifiés sur le plan biochimique et contiennent généralement une biomasse microbienne élevée, le plus souvent vivante. A ce titre, les aliments fermentés représentent une famille d'aliments tout à fait particulière. Citons par exemple les yaourts, les fromages, le kéfir, la choucroute, les olives, la bière, le vin, les salaisons, le tofu, le kombucha, le kimchi, etc, qui ont encore aujourd'hui une place très importante dans notre alimentation, que ce soit sur le plan culturel, gastronomique, économique, ou nutritionnel. D'autres aliments, comme le café, le cacao (voire le pain), même s'ils ne contiennent plus beaucoup de bactéries, ont bénéficié pour leur élaboration et le développement de leurs arômes, de la fermentation (**Lortal, 2020**).

Les aliments fermentés sont la base de l'alimentation de nombreuses populations, en particulier dans les pays en voie de développement et émergents, où la fermentation est souvent la seule façon de préserver les aliments contre les microorganismes d'altération. Ils participent également à l'identité culturelle, car ils sont souvent liés à de très anciennes habitudes et pratiques alimentaires traditionnelles (**Merabti, 2015**).

Ces aliments fermentés peuvent être considérés comme des aliments fonctionnels car ils offrent des avantages pour la santé au-delà de leur fonction nutritionnelle de base en procurant des bienfaits physiologiques démontrés et (ou) réduire le risque de maladie chronique grâce aux composants fonctionnels à effets prébiotique qu'ils contiennent ainsi que les probiotiques, qui contribuent à la santé du microbiote intestinal et du corps en général (**Contor, 2001**).

Le présent travail est une synthèse bibliographique qui s'intéresse aux aliments fermentés et à leurs effets bénéfiques sur la santé et l'importance de leur intégration dans des régimes alimentaires

sains. Le mémoire est structuré en trois chapitres ; (i) les matrices alimentaires fermentées, (ii) le microbiote des aliments fermentés et (iii) impact de la fermentation sur les propriétés fonctionnelles des aliments fermentés. Une conclusion générale, dont l'objectif est de résumer les principaux points clés ainsi que les perspectives.

CHAPITRE 01

MATRICES ALIMENTAIRES ET FERMENTATION

1 Les matrices alimentaires

L'alimentation est une combinaison de matières premières et d'ingrédients plus ou moins transformés par divers traitements (mélange, cuisson, moulage, etc.) dont le but est de conférer une fonction d'utilisation souhaitée. Ces traitements sont réalisés à l'échelle industrielle, mais aussi à domicile lors de la préparation des aliments par le consommateur, et servent à modifier la composition de l'aliment (par exemple, de nouveaux ingrédients sont produits par la cuisson) et sa structure (gélification de certains ingrédients) (**Della Valle *et al.*, 2013**). La caractérisation des aliments nécessite une description détaillée de la composition, mais cela seul n'est pas suffisant pour comprendre la relation entre la composition et les propriétés nutritionnelles ou organoleptiques de l'aliment. C'est ainsi qu'est né le concept de matrice alimentaire, qui intègre à la fois la composition et l'interaction entre les ingrédients (**Donald, 2004 ; Aguilera, 2006**).

Une matrice alimentaire peut être décrite comme « un assemblage complexe de nutriments et de composés non-nutritifs interagissant physiquement et chimiquement, qui influence le relargage, les transferts de masses, l'accessibilité, la digestibilité et la stabilité de nombreux composants alimentaires » (**Aguilera, 2005 ; Crowe, 2013 ; Della Valle *et al.*, 2013**).

2 Classification et caractéristique des matrices alimentaires

2.1 Classification des matrices alimentaires

Les matrices alimentaires sont des supports complexes constitués de différents composants alimentaires qui interagissent entre eux, tels que les macronutriments (protéines, glucides, lipides), les micronutriments (vitamines, minéraux), les fibres, l'eau et les additifs alimentaires. Les matrices alimentaires peuvent être des aliments solides, tels que les fruits, les légumes, les céréales et les viandes, ou des aliments liquides, tels que les boissons, les soupes et les sauces. La complexité de la matrice alimentaire peut influencer la biodisponibilité des nutriments et les propriétés physiques, chimiques et sensorielles des aliments. Par exemple, la présence de fibres alimentaires peut ralentir la digestion et l'absorption des glucides et des lipides, tandis que la cuisson peut affecter la teneur en nutriments et la texture des aliments. La compréhension de la structure et des propriétés des matrices alimentaires est importante pour la formulation d'aliments sains et innovants, ainsi que pour la conception de régimes alimentaires adaptés aux besoins nutritionnels individuels (**Fardet *et al.*, 2013**).

Les matrices alimentaires peuvent être classées selon différents critères, tels que leur origine, leur texture, leur composition et leur structure. Voici quelques exemples de classification des matrices alimentaires (**Fardet *et al.*, 2013**) :

- a) Origine : Les matrices alimentaires peuvent être d'origine végétale, animale ou minérale. Les aliments d'origine végétale comprennent les fruits, les légumes, les céréales et les légumineuses. Les aliments d'origine animale comprennent la viande, le poisson, les produits laitiers et les œufs. Les aliments d'origine minérale comprennent l'eau et les sels minéraux.
- b) Texture : Les matrices alimentaires peuvent être classées selon leur texture, telle que solide, semi-solide, liquide, pâteuse, etc. Les textures peuvent influencer la perception sensorielle des aliments, la digestion et la stabilité des formulations.
- c) Composition : Les matrices alimentaires peuvent être classées selon leur composition en macronutriments (protéines, glucides, lipides), en micronutriments (vitamines, minéraux), en fibres et en additifs alimentaires. La composition peut influencer la valeur nutritionnelle des aliments, leur stabilité et leur digestibilité.
- d) Structure : Les matrices alimentaires peuvent être classées selon leur structure physique, telle que cristalline, amorphe, poreuse, fibreuse, etc. La structure peut influencer la texture, la stabilité et la biodisponibilité des nutriments des aliments.

La classification des matrices alimentaires peut varier en fonction du contexte d'utilisation, mais elle est utile pour comprendre les propriétés et les effets des aliments sur l'organisme.

2.2 Caractéristique des matrices alimentaires

2.2.1 Masse volumique et densité

Le consommateur achète ses aliments au poids (ou par unité de masse) mais les ingère plutôt par unité de volume. Le rapport entre ces deux quantités est la masse volumique ρ (kg/m^3), ou densité (sans unité). Lorsqu'elle est ramenée à celle de l'eau ($\rho_{\text{eau}} = 10^3 \text{kg/m}^3$). Nous emploierons indifféremment les deux termes dans la suite.

- Lorsqu'un aliment ne contient pas d'air dans des pores, sa densité, définie alors comme densité intrinsèque, ou solide, peut être déduite de sa composition élémentaire par la relation : $1/\rho = \sum_i (X_i/\rho_i)$
 X_i est la fraction massique du constituant ($\sum_i X_i = 1$) et ρ_i sa densité,
- Si l'aliment contient des pores, de l'air, sa densité apparente ρ^* et sa densité intrinsèque ρ sont reliées par la porosité, P , définie comme la fraction de volume des vides par rapport au volume total : $P = 1 - \rho^*/\rho$

Elle fait appel à des principes de déplacement de fluides, d'invasion des pores (mercure) et, indirectement, à des méthodes de microscopie pour évaluer la taille des pores. (**Van Dalen et al., 2007**). La porosité, assez faible pour la plupart des aliments, peut avoisiner 80 % pour des produits céréaliers (pain, gâteaux) ou des desserts lactés foisonnés (mousses), et atteindre 30 % pour des fruits charnus (**Mebatsion et al., 2008**).

2.2.2 Teneur en eau, diffusivité, migration

La teneur en eau est la variable la plus importante pour la qualité des aliments, principal constituant de nombreux aliments, présente en quantités très variables, tant sensorielle que nutritionnelle. En effet, l'eau joue un rôle ubiquiste, structurant, dispersant, plastifiant, vecteur de chaleur et de molécules. La teneur peut être déterminée par des méthodes de séparation physique (dessiccation, distillation, séchages, etc.) ou basées sur une réaction chimique. Pour des activités de l'eau données, la détermination de la teneur en eau permet d'établir les isothermes de sorption, dont la connaissance est indispensable pour la conservation des aliments (**Fardet *et al.*, 2013**).

2.2.3 Rhéologie et propriétés mécaniques

Le comportement rhéologique d'un produit est défini par la relation entre les forces agissant sur le produit et la déformation ou la vitesse de déformation résultante. Un aliment peut être liquide caractérisé par sa viscosité η , ou il peut être solide et caractérisé par son module d'élasticité E . En pratique, leur comportement est souvent intermédiaire : Les aliments ont les deux propriétés et leur comportement peut être qualifié de viscoélastique. Ces deux propriétés sont importantes car elles déterminent le comportement du produit en cours d'élaboration, sont liées à sa sensation en bouche, et leurs évolutions sur des déformations et des intervalles de temps spécifiques renseignent sur la structure du produit alimentaire. De plus, il contrôle le flux ou le transport des produits dans le processus de destruction, tels que : Dans le tractus gastro-intestinal, à tel point que certains auteurs parlent " d'homéostasie rhéologique" (**Lentle et Janssen, 2008**).

3 Relation matrices alimentaires et fermentation

La fermentation est un processus naturel ou spontané mettant en évidence le monde microbien. L'homme a appris à l'utiliser empiriquement pour de nombreux biens, à savoir la production et la conservation de ses aliments. Elle ajoute de nouvelles fonctionnalités, organoleptiques, nutritionnelles, et thérapeutiques aux aliments. Elle permet ainsi à l'homme à la fois de prévoir les disettes et d'avoir une alimentation saine. Bien qu'un vieux savoir, il est important de la maîtriser et le caractériser pour éviter les risques sanitaires (**Benkerroum, 2013**).

En modifiant les matrices alimentaires il est possible de modifier le goût des aliments et leur potentiel plaisir mais aussi leurs effets métaboliques et santé. Ainsi par exemple la fermentation permettra de passer d'une matrice liquide (lait) à semi-solide ou visqueuse (yaourts) voire « solide » après pressage et affinage (certains fromages). L'effet matrice implique que deux aliments de même composition nutritionnelle mais avec des structures différentes n'auront pas les mêmes effets métaboliques. La fermentation est bénéfique pour les matrices alimentaires, car elle améliore la saveur, la texture, la digestibilité et la valeur nutritionnelle des aliments. Les micro-organismes utilisés pour la fermentation peuvent également produire des composés utiles tels que les

probiotiques, les vitamines, les enzymes et les acides organiques. Les matrices alimentaires peuvent influencer la fermentation en fonction de leur composition chimique, de leur pH, de leur teneur en eau et de leur structure physique. Par exemple, la présence de sucres et d'amidon peut favoriser la croissance des levures et des bactéries responsables de la fermentation alcoolique, tandis que la présence de fibres et de composés antimicrobiens peut inhiber leur croissance.

En résumé, la relation entre les matrices alimentaires et la fermentation est complexe et dépend de nombreux facteurs. La compréhension de cette relation peut aider à optimiser les processus de fermentation pour produire des aliments fermentés de qualité supérieure (**Kamal-Eldin, 2012**).

3.1 Importance de la fermentation

De manière générale, la fermentation joue des rôles importants dans le domaine alimentaire qui sont (**Holzappel, 2002**) :

- Le développement des caractéristiques organoleptiques (flaveur, saveur, texture, etc.) des aliments (**Nout, 2009**) ;
- L'amélioration de la qualité sanitaire et l'augmentation de la durée de conservation de l'aliment par la fermentation, les aliments fermentés présentent d'autres intérêts qui peuvent expliquer leur forte consommation dans certains pays (**Mouquet-Rivier *et al.*, 2008**) ;
- L'amélioration de la qualité nutritionnelle et la détoxification des aliments par la réduction de facteurs antinutritionnels (tannins, phytates, polyphénols, etc.), la dégradation ou l'inactivation de toxines naturelles notamment les glucosides cyanogéniques du manioc (**Padmaja *et al.*, 1993** ; **Kimaryo *et al.*, 2000**) ;
- Les caractéristiques physico-chimiques des aliments fermentés sont souvent très différentes de celles de la matière première initiale : pH, acidité, potentiel redox ou activité antioxydant, micro-macrostructure. Par conséquent, la texture, le goût, la sensation en bouche de ces denrées sont très éloignés de ceux de la matière première dont ils sont issus (**Savary-Auzeloux et Rul, 2021**).

4 Les types de fermentation

La fermentation est un procédé intéressant dans un contexte de développement durable et d'amélioration des systèmes alimentaires puisqu'il produit peu d'effluents et requiert peu d'énergie pour être mis en place. Dans les aliments fermentés, la fermentation la plus fréquente est la fermentation lactique, même si les fermentations acétiques et alcooliques sont rencontrées (**Beuchat, 1997**).

4.1 La fermentation lactique

Définie comme un procédé de fermentation dans lequel interviennent un groupe de bactéries gram positive, non-sporulantes, immobiles, catalase-négatives, qui croissent sous des conditions anaérobies et utilisent les sources de carbone pour produire de l'acide lactique comme seul ou majeur acide organique (**Ketiku et Oyenuga, 1970**).

4.2 La fermentation alcoolique

La fermentation alcoolique consiste en une biotransformation des jus de fruits ou toute solution sucrée en vin et fait intervenir des phénomènes physiques, biochimiques et biologiques complexes. Elle consiste en la transformation par les levures, principalement *Saccharomyces cerevisiae* des sucres du moût, principalement le glucose et le fructose en éthanol et en dioxyde de carbone (**Nehme, 2008**).

La fermentation alcoolique consiste principalement en la dégradation du sucre du moût et la production d'éthanol et de dioxyde de carbone. Au-delà de cette réaction, d'innombrables autres voies métaboliques transforment complètement le milieu. Différentes opérations techniques assurent l'homogénéisation du moût, l'oxygénation nécessaire aux levures et l'extraction des composés de la couleur des vins (**Visser et Scheffers, 1990**).

4.3 La fermentation acétique

La fermentation de l'acide acétique est dirigée par des bactéries acétiques, malgré le fait que l'acide acétique l'acide peut également être produit pendant la fermentation par d'autres micro-organismes, tels que Les bactéries lactiques (BL) et levures hétérofermentaires. Les bactéries acétiques contiennent jusqu'à 19 genres ; ceux associés à la fermentation des aliments appartiennent aux genres *Acetobacter*, *Gluconobacter*, *Gluconoacetobacter* et *Komagataeibacter*. Espèce appartenant à ces genres sont constamment isolés lors de vinaigre spontané, kombucha, kéfir, fermentation du cacao et de la bière lambic. L'acide acétique est produit par fermentation oxydative au cours de laquelle les déshydrogénases de la chaîne respiratoire catalysent l'oxydation des molécules, telles que l'éthanol, les glucides et les alcools de sucre à une grande variété de produits comprenant des acides organiques, des aldéhydes et des cétones. Les bactéries de l'acide acétique sont caractérisés par leur métabolisme aérobie strict. De plus, *Gluconobacteroxydans* semblent dépourvus de deux composants importants de la chaîne respiratoire, à savoir les gènes codant pour la cytochrome c oxydase et le NADH translocation de protons : ubiquinone oxydoréductase, compromettant ainsi la translocation des protons conduisant à une mauvaise capacité de croissance (**Prust et al., 2005**).

4.4 La fermentation malolactique (FML)

La FML dans le vin est la conversion enzymatique de l'acide L-malique en acide L-lactique et CO₂. Ce phénomène suit généralement la fermentation alcoolique, mais il peut également se produire simultanément. L'activité de la FML est moins intense mais plus longue que celle de la fermentation alcoolique. Elle demande la plupart du temps entre 4 à 6 semaines (**Bastard, 2015**).

La FML joue un rôle important dans la détermination de la qualité finale de la plupart des vins en contribuant à la stabilisation microbiologique du vin final. La consommation des sucres résiduels et de l'acide malique permet d'inhiber une éventuelle activité microbienne (**Nedovic et al., 2000**).

4.5 La fermentation propionique

La fermentation à l'acide propionique est une fermentation dans laquelle le produit final principal est l'acide propionique. Plusieurs espèces microbiennes peuvent produire de l'acide propionique par voies de fermentation (voies acrylate, succinate et 1,2-propanediol, etc.) (**Gonzalez-Garcia et al., 2017**). Concernant les micro-organismes associés aux fermentations alimentaires, celle-ci est réalisée par *Propionibacterium freudenreichii* et *Pro. Acidipropionici* à travers le cycle de Werkman et décarboxylation du succinate. Les deux espèces sont utilisées comme entrées pour l'affinage des fromages à pâte dure et contribuent à leur saveur caractéristique et texture, bien qu'ils ne soient pas considérés comme adaptés au lait comme substrat de croissance (**Pivateau et al., 2000**).

5 Les aliments fermentés

5.1 Définition

Une revue de l'association scientifique internationale des probiotiques et des prébiotiques a très récemment fait le point sur la définition qui peut être attribuée aux aliments fermentés ainsi qu'à leur rôle dans l'alimentation humaine. D'un point de vue biochimique, la fermentation se définit comme « un processus générant de l'ATP dans lequel les composés organiques agissent à la fois en tant que donneurs et accepteurs d'électrons ». Cette définition s'applique bien aux fermentations anaérobies lactiques ou alcooliques (yaourt, vin, etc.), mais pas aux produits faisant appel à des fermentations aérobies, telles que celles mises en œuvre dans la production de la sauce soja (champignons) ou le vinaigre (BL). Par conséquent, les experts ont retenu une définition plus large pour décrire les aliments et les boissons fermentés : « aliments obtenus suite à la croissance désirée de microbes et de conversions enzymatiques de matières premières alimentaires » (**Savary-Auzeloux et Rul, 2021**).

Les aliments fermentés sont présents dans absolument tous les régimes du monde et sont extrêmement diversifiés ; plus de 5000 ont été référencés. Il est possible de fermenter des feuilles,

des fruits, tous les légumes, des graines, des farines de toutes sortes, du lait, de la viande, du miel, etc (tableau 1) (Lortal *et al.*, 2020).

Tableau 1 : Principales classes de produits fermentés, matières premières utilisées, microorganismes réalisant la fermentation, ainsi que lieu majeur de production et de consommation (Savary-Auzeloux et Rul, 2021).

Type de produit	Matières premières	Nom du produit	Microorganismes impliqués	Situation géographique
Produits laitiers	Lait	Yaourt	BL	Europe, Amérique
	Lait, sel	Fromage	AB, B Ac, CF, BL, Lev selon les fromages	Europe, Amérique, Océanie
	Lait	Lait fermenté (kéfir, lait ribot, lassi, etc.)	Lev, BL, AB, B Ac	Mondiale (sous différents noms)
Fruits	Fève de cacao	Chocolat	Lev, BL, AB, B Ac	Afrique, Amérique latine, exportation mondiale
	Jus de pomme ou d'autres fruits, eau (sucre pour kéfir)	Cidre, kéfir de fruits	BL, AB, Lev	Mondial
Graines, racines, tubercules	Farine de blé, eau	Pain au levain	Lev, BL	Amérique, Europe, Australie
	Graine de soja, eau, sel	Sauce soja, miso	CF	Asie, exportation mondiale
Viandes	Viande, sel	Saucisson, salamis, jambons	Lev, CF, BL, AB,	Europe, Amérique du Nord, Asie

AB : autres bactéries ; **B Ac** : Bactéries acétiques ; **BL** : bactéries lactiques ; **CF** : champignons filamenteux ; **Lev** : levures.

5.2 Classification

5.2.1 Les produit laitiers

Les produits laitiers sont d'une très grande diversité, car le lait peut provenir d'animaux différents, il n'est commun que chez quelques-uns, dont la vache, la brebis et la chèvre. De plus, les produits laitiers sont diversifiés, ce qui permet d'en utiliser plus sans se lasser afin de ne pas se passer de leurs apports variés en nutriments (**Audrey, 2020**).

5.2.1.1 Lait fermenté

Le lait est un liquide hétérogène blanchâtre, constitué majoritairement d'eau (jusqu'à 90%), et contenant tous les groupes de nutriments : matières grasses ou lipides, glucides, protéines, minéraux et vitamines (**Karam, 2013**).

Selon la réglementation française (décret n°88/1203 du 30 décembre 1988), un lait fermenté est un produit laitier composé exclusivement de matières premières d'origine laitière (lait et constituants du lait), ayant subi une pasteurisation et une fermentation par des micro-organismes spécifiques et caractérisé par une teneur en acide lactique minimale de 0,6 % (**Béal et Helink, 2019**).

Les laits fermentés sont classés en deux grands groupes en fonction de la présence de microorganismes dominants :

- Les fermentations lactiques dominées par les espèces de BL et constituées de type thermophile (par exemple, yogourt, babeurre bulgare), de type probiotique (lait acidophilus, Yakult, lait bifidus), et le type mésophile (par exemple, lait fermenté naturel, lait de culture, crème de culture, babeurre de culture) ;
- Les fermentations fongiques-lactiques où les BL et les levures coopèrent pour générer le produit final et se composent de laits alcoolisés (par exemple, kéfir, koumis, lait de levure acidophilus) et de laits moisissés (par exemple, viili) (**Mayo et al., 2010**).

5.2.1.2 Le fromage

Cet aliment est principalement obtenu à partir de lait de vache, chèvre, brebis ou bufflonne, et occasionnellement de chamelle, renne ou autres ruminants. Les premières références historiques faisant mention du fromage remontent au néolithique (7000 ans av-JC), mais son origine pourrait être encore plus ancienne (**Kindstedt, 2018**).

5.2.1.3 Le yaourt

Le yaourt est défini comme un produit laitier semi-solide fabriqué en ajoutant des bactéries spécifiques souches (*Streptococcus salivarius subsp. Thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* souvent co-cultivées avec d'autres BL pour le goût ou la santé effets) dans le lait, fermentant sous des températures contrôlées (42-43C°) produit l'acide lactique après l'ingestion

bactérienne de sucres naturels du lait augmente l'acidité, provoquant protéines de lait à coaguler en une masse solide (caillé) (yildiz, 2016).

5.2.2 Les céréales fermentée

Les aliments céréaliers fermentés peuvent avoir des caractéristiques nutritionnelles très différentes des graines à partir desquelles ils sont produits. Ces différences peuvent être dues à la transformation subie par les céréales, ainsi qu'au mode de consommation (boisson, bouillie, etc.). Par exemple, le degré de fractionnement des graines a un impact sur les teneurs en nutriments des farines obtenues (Slavin *et al.*, 2001). Divers composés sont formés à partir de l'hydrolyse des composants des céréales (amidon, protéines et lipides), par des enzymes d'origine endogène et microbienne. En fonction de la structure chimique et la production des métabolites générés par ces activités enzymatiques, le goût, la texture, la consistance et les propriétés fonctionnelles des produits sont affectés (Kamal-Eldin, 2012).

Les aliments céréaliers fermentés naturellement ont un microbiote complexe, c'est-à-dire composé de dizaines d'espèces différentes pour un même aliment, principalement constitué de BL et de levures (Franz *et al.*, 2014).

Les variétés de céréales les plus consommées dans le monde sont : le blé dur, le maïs, le riz, le seigle, l'orge, l'avoine, etc. Leur importance varie selon les régions géographiques où elles sont naturellement cultivées (Belton et Taylor, 2002).

Les produits fermentés qui en résultent sont généralement classés en trois catégories : pain ou pâte au le vain, bouillies et boissons (alcoolisées et non alcoolisées) (Blandino *et al.*, 2003 ; Tamang, 2010).

Nutritionnelles des principales céréales sont connues et le **tableau 2** en présente quelques exemples.

Tableau 2 : Aliments et boisson traditionnels, à base de céréales fermentées, consommés dans différentes régions du monde (Guyot, 2010).

Nom du Produit	Pays d'origine	Céréale utilisée	Utilisation
Ben-saalga,koko	Burkina Faso, Ghana	Millet de perle	Bouillie
Bhaati jaanr	Inde, Népal	Riz	Boisson alcoolisée (douce-acide)
Dosa	Inde	Riz et haricot urd	Crêpes
Hussuwa	Soudan	Sorgho	Pâte comme aliment
Mahewu	Afrique du Sud, Zimbabwe	Maïs	Boisson
Idli	India	Riz et haricot urd	Gâteaux cuits à la vapeur
kenkey	Ghana	Maïs	Pâte cuite à la vapeur
Ogi	Afrique de l'ouest	Maïs, millet, sorgho	Aliment de base prêt-à servir
Togwa	Afrique de l'est	Maïs	Boisson
Pain au levain	Europe, Amérique, Australie,	Blé, seigle	Pain baguette

5.2.3 Les végétaux fermentés

Les aliments fermentés à base de végétaux sont consommés partout dans le monde, d'une part grâce à leur saveur et goûts uniques et d'autre part grâce à leurs effets bénéfiques pour notre organisme. Ils peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur composition (**Fessard, 2017**) :

- Les produits à base de fruits et légumes (olives, chou, chou-fleur, radis, concombre).
- Les produits à base de légumineuses (soja, haricots).
- Les produits à base de racines et tubercules (manioc, patate douces).
- Les boissons (thé, riz, céréales).

Les gens mangent des plantes, domestiquées et sauvages, les préparant selon une variété de recettes. Les légumes-feuilles périssables et saisonniers, les radis, les concombres, y compris les jeunes pousses de bambou tendres comestibles, sont traditionnellement fermentés en produits comestibles en utilisant les connaissances indigènes (**Savadoغو et al., 2011**).

5.2.4 Les viandes fermentées

La matière première la chair des animaux constitue depuis toujours une des bases de l'alimentation humaine. L'industrie de la viande représente un des principaux secteurs de l'industrie

alimentaire. La viande est considérée comme un aliment de choix en fonction de sa valeur nutritive. Sa richesse en protéines et la nature de celle-ci en font un aliment difficilement irremplaçable. Cependant, en raison même de ses qualités nutritionnelles, la viande constitue un terrain très favorable à la plupart des contaminations microbiennes (principalement les organismes protéolytiques). Il s'agit donc d'une denrée fragile, périssable avec une courte durée de conservation avant la vente si aucune technique de conservation n'a été appliquée (**Quaranta, 2007**).

CHAPITRE 02 :
MICROBIOTE DES ALIMENTS FERMENTES

1 Le microbiote des matrices alimentaires

1.1 Définition du microbiote

Le microbiote est l'ensemble des micro-organismes présents dans un environnement (ou « niche écologique ») donné, recoupant ainsi la notion, historique, de flore bactérienne. Le microbiome, au sens large, correspond l'ensemble de la niche écologique considérée. Celle-ci inclut à la fois les micro-organismes résidents (bactéries, virus, parasites et champignons) et les facteurs pouvant influencer l'environnement (**Pichon et al., 2018**).

1.2 Microbiote des matrices fermentées

Les microorganismes attirent l'attention depuis de nombreuses années de la part des chercheurs et du monde industriel. Dans les pays du nord, les fermentations des aliments sont souvent intégrées à des stratégies marketing ou bien dans la construction d'allégations nutritionnelles, en réponse à l'attention croissante portée par les consommateurs aux modes de vie sains ou bien pour répondre à des caractéristiques organoleptiques. Dans les pays du sud, la fermentation est encore le moyen unique et le moins cher de conserver les aliments. Cette description est un peu caricaturale mais elle permet de souligner la différence qui existe entre les attentes des consommateurs de ces pays et ceux des pays en développement et des zones rurales des pays émergents (**Humblot, 2015**).

2 Les microorganismes impliqués dans la fermentation des matrices alimentaires

2.1 Les bactéries lactiques (BL)

Le groupe des BL comprend de nombreux genres de morphologies variées comme *Carnobacterium*, *Enterococcus*, *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Oenococcus*, *Paralactobacillus*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Tetragenococcus*, *Vagococcus*, et *Weisella*. Les BL sont retrouvées partout dans la nature y compris chez l'homme. Les différents genres de BL sont séparés par une divergence évolutive considérable et ce malgré des caractéristiques physiologiques communes (**Turpin, 2011**). De nombreuses BL ont le statut GRAS (Generally Recognised As Safe/généralement reconnu comme sûr) selon la FDA, ou le statut QPS (Qualified Presumption of Safety/présomption d'innocuité reconnue) selon l'EFSA, c'est-à-dire que la consommation de ces micro-organismes n'engendre généralement pas de risque pour la santé (**EFSA, 2016 ; FDA, 2016**). De plus, les BL ont toutes la capacité de produire de l'acide lactique à partir du glucose (**Stiles et Holzapfel, 1997**).

Les BL sont des microorganismes capables de fermenter les sucres (principalement le glucose) en acide. Le principal produit de la réaction est l'acide lactique. Elles sont à gram positif, ne forment pas de spores, se présentent sous forme de coques, de bacilles ou de bacilles arrondis (**figure 1**) et possèdent dans leur ADN une faible proportion de bases guanine – cytosine (GC % <50). Les

BL sont généralement catalase négative, mais certaines possèdent une pseudo-catalase. Elles sont anaérobies mais aérotoles. Elles requièrent la présence d'acides aminés, d'acides gras, de vitamines et de minéraux pour leur croissance (**Fessard, 2017**).

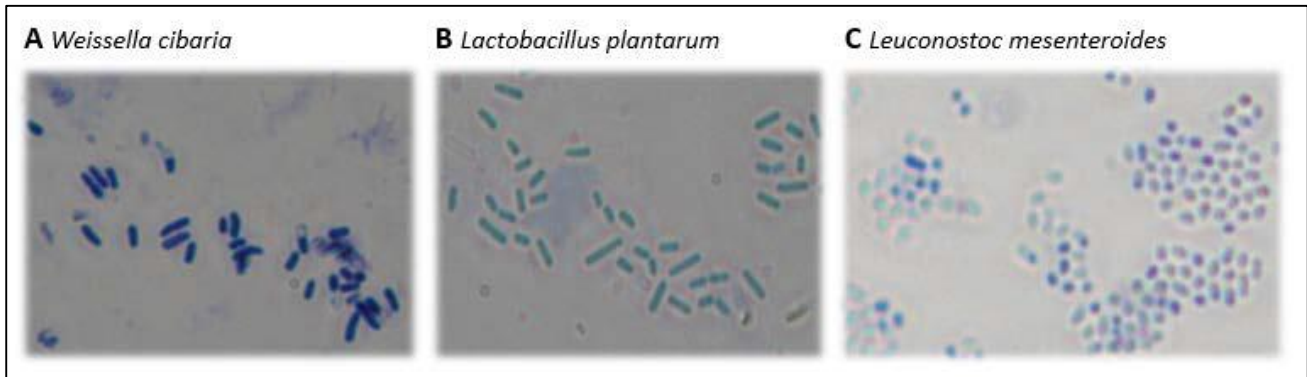


Figure 1: BL sous forme de bacilles arrondies (A), de bacilles (B) ou de coques (C), colorées au bleu de méthylène (**Fessard, 2017**).

Les BL sont des microorganismes ubiquistes et peuvent être isolées de divers substrats et environnements. Leurs principaux habitats sont : les produits alimentaires fermentés ou non comme les laits et produits laitiers, les grains, les fruits, les légumes, les boissons (jus de fruit, bières, cidres, vins, etc), les produits de panification, les viandes, les poissons, les plantes, les fourrages et ensilages, les eaux usées, les sols, mais également le tractus génital, digestif et respiratoire de l'homme et des animaux (**Novel, 1993**). L'acide lactique est le composé principal résultant du métabolisme des sucres. Comme c'est le cas dans les produits laitiers, carnés, végétaux ou le kéfir, l'activité de ces bactéries peut impacter positivement ou négativement le profil organoleptique des aliments fermentés (production d'acide lactique, acide acétique, acide succinique, acide formique, diacétyl, éthanol, gaz carbonique et exopolysaccharides (EPS) notamment) (**Lynch et al., 2018**).

La fermentation lactique des aliments constitue l'une des plus anciennes formes de conservation de la nourriture. Les BL sont utilisées empiriquement depuis des siècles dans la fabrication de nombreux aliments fermentés comme les produits laitiers (yaourts et fromages). Ces bactéries interviennent également dans la fabrication des salaisons, du vin et des ensilages (**tableau 3**) (**Drouault et Corthier, 2001**).

Tableau 3 : Exemples BL utilisées dans la fermentation des aliments (**Drouault et Corthier, 2001**).

Aliments/produits	Ingrédients	BL
Produits laitiers		
Fromages	Lait de vache, chèvre ou brebis	<i>Lactocoques, lactobacilles...</i>
Yaourt	Lait de vache	<i>S. salivarius subsp. Thermophilus</i> et <i>Lb. Bulgaricus subsp. Delbrueckii</i>
Lait fermenté	Lait de vache	<i>Lb. Acidophilus</i>
Kéfir	Lait de vache, de jument ou de chèvre	<i>Lb. Kefir</i>
Produits carnés et de la pêche		
Saucisse sèche	Porc, bœuf	<i>Pediocoques, Lb. Plantarum,</i> <i>Lb. Brevis</i>
Saucisse semi-sèche	Porc	<i>Pediocoques</i>
Izushi	Poisson, riz, légumes	<i>Leu. Mesenteroides, Lb. plantarum</i>
Produits végétaux		
Ogi (Nigeria)	Maïs	<i>Lb. plantarum, L. lactis</i> <i>Pédiocoques, Lb. Plantarum,</i>
Olives	Olives vertes	<i>Lb. Brevis, Leu. Mesenteroides</i>
Pickles	Concombres	<i>Pédiocoques, Lb. Plantarum</i>
Choucroute	Chou	<i>Leu. Mesenteroides, Lb. Plantarum</i>
Sauce soja	Soja	<i>Lb. Bulgaricus subsp. delbrueckii</i>
Vin	Raisin	<i>Leu. Oenos</i>
Sake	Riz	<i>Lb. Sake, Lb. homohiochi,</i> <i>Leu. Mesenteroides</i>
Pain		
Idli	Farines de riz et de haricots	<i>Leu. Mesenteroides</i>
“San Francisco sourdough”	Farine de blé	<i>Lb. Sanfrancisco</i>

Les BL sont un groupe de bactéries unies par une multitude de caractéristiques morphologiques, métaboliques et physiologiques. Le terme de BL est intimement associé aux habitats riches en nutriments (lait, viande, végétaux) et aux aliments fermentés, mais d'autres sont aussi associées aux différentes surfaces des muqueuses des mammifères (**Axelsson, 2005**).

Enterococcus est l'un des genres les plus importants de BL en raison de sa large distribution dans l'environnement et de l'occupation de diverses niches écologiques, allant de divers aliments fermentés au tractus intestinal des humains et des animaux. En étant un membre normal de la flore intestinale (**Shepard et Gilmore, 2002**).

Ces bactéries ont des exigences nutritionnelles variables selon la souche et l'espèce mais la plupart se développent dans des milieux relativement riches en vitamines, sels, peptides, acides gras et acides aminés. Leur métabolisme leur permet de croître à pH bas compris entre 4,0 et 4,5.

Cependant certaines peuvent se multiplier à des températures extrêmes (4°C et 45°C) et à des pH extrêmes (9,6 et 3,2) (**Turpin, 2011**).

2.2 Les levures

Les levures appartiennent au groupe de champignons unicellulaires qui se reproduisent par bourgeonnement ou fission binaire. Trois classes en existent selon le mode de reproduction : les *ascomycètes*, les *basidiomycètes*, et les *deutéromycètes*. Les levures représentent les eucaryotes les plus simples vu leur composition cellulaire. Elles sont constituées d'enveloppes cellulaires, d'un cytoplasme contenant divers organites, et d'un noyau renfermant les chromosomes (**Al Daccache, 2019**).

Elles ne sont considérées comme les êtres vivants unicellulaires responsables de la fermentation, que depuis le début du XIX^{ème} siècle. Les plus couramment employées en alimentation sont les levures de boulangerie et aussi les levures résultant de la fabrication de la bière (ce qui permet une valorisation des déchets) (**Mury, 1989**).

Dans le cadre de la production d'aliments, le mot levure désigne couramment l'espèce *Saccharomyces cerevisiae* qui est l'agent principal de la fermentation alcoolique intervenant dans la fabrication du pain, de la bière, du cidre et du vin. L'inoculation de *S. cerevisiae* sous forme de levure sèche active ou de culture liquide commercialisée est courante et permet des fermentations en culture dite pure (**Kurtzman et al., 2011**).

Saccharomyces cerevisiae est la principale espèce de levures utilisée lors de l'élaboration de boisson alcoolisée. D'autres espèces peuvent intervenir lors des fermentations spontanées, et joue un rôle significatif mais de façon complexe et souvent imprévisible. En effet, Pasteur était le premier à remarquer la présence de différents types de microorganismes lors de la fermentation. Différentes levures peuvent être présentes au cours de la première étape de la fermentation, laissant ensuite la

place à un autre type de levure, appelé maintenant *S. cerevisiae* (Barnett, 2000). La fonction de la levure pendant la fermentation ne se limite pas seulement à la transformation des sucres en alcool, mais un métabolisme complexe en est derrière. Le métabolisme de chaque levure induit la formation de différents métabolites et sous-produits qui pourraient avoir un impact essentiel sur la qualité organoleptique du produit fermenté (Al Daccache, 2019).

2.3 Les bactéries propioniques

Il existe deux grands groupes pour le genre *Propionibacterium* en fonction de leur origine : les bactéries propioniques laitières et les bactéries propioniques cutanées qui font partie du microbiote commensal de la peau et des muqueuses humaines. Les bactéries propioniques sont des bactéries à gram positif, bacilles ou forme coccoïdales, immobiles, anaérobies facultatives, catalase positive capables de produire de grande quantité d'acide propionique à partir du lactate. Les bactéries propioniques laitières comprennent 4 espèces : *P. acidipropionici*, *P. jensenii*, *P. thoenii* et *P. freudenreichii* actuellement divisé en 2 sous espèces selon leur capacité à fermenter le lactose et à réduire le nitrate (Freitas *et al.*, 2015).

Les bactéries propioniques jouent un rôle essentiel dans l'affinage des fromages à pâte pressée cuite de type emmental, dans lesquels elles fermentent le lactate produit par les BL en propionate, acétate et CO₂, contribuant ainsi au goût caractéristique et à l'ouverture de ces fromages (Baer *et al.*, 1993).

2.4 Les bactéries acétiques

Les bactéries acétiques sont des bactéries à gram négatif en forme de bâtonnet (bacille) ou ellipsoïdale, catalase positive, oxydase négative, parfois mobiles car elles possèdent des flagelles polaires ou périt riches. Elles ont un métabolisme strictement aérobie, avec l'oxygène comme accepteur d'électron terminal. Elles sont mésophiles avec un optimum de température de croissance compris entre 25 et 30°C (Teyssier et Hamdouche, 2016).

Les bactéries acétiques sont des microorganismes retrouvés dans différents environnements, comme sur les fleurs, mais plus particulièrement dans les aliments et/ou les boissons fermentés (tableau 4). Leur production d'acide acétique les rend indésirables en œnologie ou zythologie car la qualité finale des produits est fortement détériorée. Cependant, leur présence est désirable, même nécessaire, pour la production de vinaigre et de cacao (Farrera, 2019).

Dans le domaine de la production d'aliments, les bactéries acétiques sont les agents clés de la production de vinaigre à partir de substrats fermentés comme le cidre, la bière ou le vin (Ho *et al.*, 2017).

Tableau 4 : Bactéries de l'acide acétique impliquées dans les fermentations spontanées (Paramithiotis, 2021).

Produit	Espèces de bactéries d'acide acétique
Vinaigre balsamique	<i>A. aceti</i> , <i>A. malorum</i> , <i>A. pasteurianus</i> , <i>Ga. Europaeus</i> , <i>Ga. Hansenii</i> , <i>Ga. xylinus</i>
Vinaigre vieilli du Shanxi	<i>A. indonesiensis</i> , <i>A. malorum</i> , <i>A. orientalis</i> , <i>A. pasteurianus</i> , <i>A. senegalensis</i> , <i>Glu. oxydans</i>
Vinaigre de diospyros kaki	<i>A. malorum</i> , <i>A. pasteurianus</i> , <i>A. syzygii</i> , <i>Ga. Europaeus</i> , <i>Gaintermedius</i> , <i>Ga. saccharivorans</i>
Vinaigre de myrtille	<i>A. pasteurianus</i>
bière lambic	<i>A. fabarum</i> , <i>A. lambici</i> , <i>A. orientalis</i> , <i>Glu. Cerevisiae</i> , <i>Glu. cerinus</i>
Kéfir de lait	<i>A. syzygii</i> , <i>Glu. japonicus</i>
Kéfir sucré	<i>A. fabarum</i> , <i>A. orientalis</i> , <i>A. lovaniensis</i> , <i>Glu. liquefaciens</i>
Les fèves de cacao	<i>A. cerevisiae</i> , <i>A. cebinongensis</i> , <i>A. fabarum</i> , <i>A. ghanaensis</i> , <i>A. lovaniensis</i> , <i>A. malorum/cerevisiae</i> , <i>A. malorum/indonesiensis</i> , <i>A. orientalis</i> , <i>A. pasteurianus</i> , <i>A. peroxydans</i> , <i>A. pomorum</i> , <i>A. senegalensis</i> , <i>A. syzygii</i> , <i>Glu. Europaeus</i> , <i>Ga. Entanii</i> <i>Ga. Persimonis</i> , <i>Ga. saccharivorans</i>
Haïpao	<i>A. aceti</i> , <i>A. pasteurianus</i> , <i>A. xylium</i> , <i>Glu. oxydans</i>
Kombucha	<i>Acetobacter spp.</i> , <i>Gluconobacter spp.</i>

A. : *Acetobacter* ; Glu. : *Gluconobacter* ; Ga. : *Gluconoacetobacter*

3 Le rôle des microorganismes dans la fermentation des matrices alimentaires

- La fermentation des aliments a été la clé d'une grande partie de l'histoire humaine le moyen le plus courant de conserver les produits périssables. Cela contribue à certains des avantages tels que l'ajout de nouveaux goûts, arômes, saveurs et textures. Elle permet l'amélioration également de la valeur nutritionnelle des aliments, la digestibilité, la production de vitamines, l'élimination des toxines et la réduction de l'énergie et du temps de cuisson (**Kamal-Eldin, 2012**).

- Les fermentations permettent la conservation de l'aliment en inhibant le développement de bactéries pathogènes ou d'altérations à travers l'acidification et la production de bactériocines (**Han *et al.*, 2001**).
- Les microorganismes ont un impact positif sur la fermentation en libérant des arômes favorables, mais d'autres peuvent libérer certaines substances menant ainsi à la formation d'arômes indésirables (**Martín *et al.*, 2018**).
- Les activités métaboliques des champignons filamenteux sont également exploitées pour la production de nombreuses molécules actives telles que des enzymes et des antibiotiques (**Bennett, 1998**).

CHAPITRE 03

IMPACT DE LA FERMENTATION SUR LA FONCTIONNALITÉ DES MATRICES ALIMENTAIRES

1 Aliments fonctionnels

Les aliments fonctionnels sont des aliments qui prétendent être bénéfiques pour la santé au-delà de la fourniture d'une alimentation de base. La définition généralement acceptée est celle des aliments dont on peut démontrer de manière satisfaisante qu'ils ont un impact positif sur une ou plusieurs fonctions souhaitées dans l'organisme, au-delà du plein effet nutritionnel, voies pertinentes pour améliorer la santé et le bien-être et/ou réduire le risque de maladie (**Stanton *et al.*, 2005**).

2 Polyphénols dans les aliments fermentés et leurs avantages et potentiels pour la santé

2.1 Définition des polyphénols

Les polyphénols sont des composés phytochimiques que l'on trouve principalement dans les fruits, les légumes, le thé, le café, les chocolats, les légumineuses, les céréales et les boissons. Il existe plus de 8000 polyphénols identifiés dans la nature et leur les fonctions principales sont comme antioxydant. Ils protègent notre corps contre les dommages des radicaux libres et des rayonnements UV ou agression par des agents pathogènes. Au cours des deux dernières décennies, on s'est davantage intéressé aux avantages potentiels pour la santé des polyphénols alimentaires en tant qu'antioxydants (**Pandey et Rizvi, 2009**).

En effet, leurs propriétés bénéfiques pour la santé humaine seraient nombreuses (**Chung *et al.*, 1998**). Dans le corps humain, les polyphénols sont des antioxydants et ont diverses propriétés biologiques. Propriétés anti-diabétiques, anticancéreuses, anti-inflammatoires, cardioprotectrices, ostéoprotectrices, neuroprotectrices, antiasthmatiques, antihypertenseurs, anti-âge, antiseptiques, hypocholestérolémiantes, hépatoprotectrices, antifongiques, antibactériennes et antivirales (**Ganesan et Xu, 2017**).

2.2 Fermentation des matrices alimentaires et biodisponibilité des polyphénols

Les polyphénols sont donc impliqués dans de nombreux mécanismes pouvant avoir une incidence positive sur la santé. Cependant, avant de conclure sur leur activité bénéfique réelle, il reste indispensable de réaliser des études de biodisponibilité. La proportion « biodisponible » d'un composé actif désigne la quantité de ce composé qui est disponible pour exercer une action bénéfique dans l'organisme. Le terme « biodisponibilité » recouvre donc les étapes d'absorption, de métabolisation, de stockage et d'excrétion de ce composé, la finalité étant la détermination de la quantité finale disponible sous forme active dans l'organisme (**Dupas, 2005**).

2.3 Polyphénols et fermentation

La fermentation des aliments d'origine végétale entraîne la dégradation des constituants de la paroi cellulaire et libère des composés phénoliques. Les familles des composés phénoliques considérés comme des phytoestrogènes et présents dans les aliments fermentés d'origine végétale sont les isoflavones, les stilbènes (**Sharma *et al.*, 2021**).

La fermentation alimentaire avec des bactéries productrices d'enzymes spécifiques ont le potentiel d'ajouter de la valeur aux produits fermentés par amélioration de la biodisponibilité des polyphénols et leur bioconversion en produits hautement actifs. Par ailleurs, les bienfaits pour la santé associée aux aliments fermentés, riches en polyphénols et leurs produits transformés, doivent être validés par des animaux études et essais cliniques (**Sener-Aslay et Tacer-Caba, 2021**).

Tableau 5 : Fermentation alimentaire et effet des polyphénols

Aliment	Effet des Polyphénols	Référence
Yaourt	Propriétés antioxydantes	(Sah et al.,2014)
Fromage	Effet anticancérigène et antiathérogène.	(Xiang et al., 2019)
Kéfir	Augmentation de l'activité antioxydante.	(Aiello et al.,2020)
Produits carnés	Antioxydants. inhibition de l'activité lipoxygénase et action de la metmyoglobine comme agent réducteur pour préserver la couleur.	(Papuc et al.,2017)
Pain et autres produits de boulangerie	l'activité antioxydante	(Skrajda-Brdak et al., 2019)
Soja	Propriétés anticancéreuses Propriétés antioxydantes	(Lee et al., 2018)
Légumineuses	L'activité antioxydante	(Gobbetti et al., 2020)
fruits	Potentiel antioxydant total des fruits à partir des composés phénoliques	(Michels et Frei, 2013)

3 Peptides bioactifs et aliments fermentés : production et fonctionnalité

3.1 Les aliments riches en protéines comme source de peptides bioactifs

Les produits alimentaires fermentés riches en protéines sont une importante source de peptides bioactifs, qui sont produits par hydrolyse de protéines alimentaires spécifiques. La production de ces peptides dépend principalement de la composition en protéines de la matière alimentaire (**Samurailatpam et al., 2021**).

3.2 Avantages pour la santé des peptides bioactifs dans aliments fermentés

Les peptides bioactifs présents dans divers aliments fermentés présentent différentes propriétés bénéfiques pour la santé (**figure 2**). Certaines des propriétés bénéfiques pour la santé signalées dans le monde entier concernant les peptides bioactifs dans les produits alimentaires fermentés sont des

peptides antihypertenseurs qui inhibent ou abaissent l'hypertension, des peptides antioxydants qui récupèrent ou fixent les radicaux libres et préviennent plusieurs problèmes liés à l'âge, les peptides antidiabétiques et les acides aminés qui contrôlent le diabète de type II, les peptides anticancéreux, les peptides antimicrobiens qui luttent contre les microbes producteurs de toxines et les peptides immunomodulateurs qui renforcent le système immunitaire (tableau 6) (Samurailatpam *et al.*, 2021).

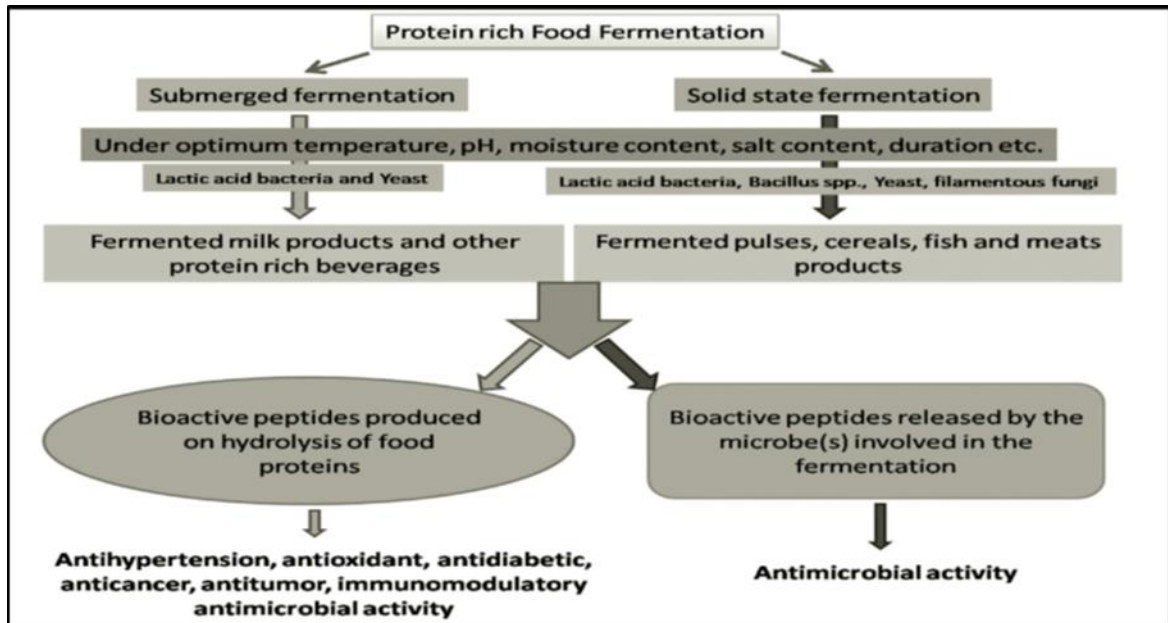


Figure 2 : Types de fermentation et production de peptides bioactifs (Samurailatpam *et al.*, 2021).

3.2.1 Produits laitiers fermentés

Les produits laitiers est une bonne source de peptide bioactifs, comme le fromage qui sont produit à partir de la fermentation et de maturation (Rai *et al.*, 2017). Lors de la fermentation du lait, les protéines du lait α 1, α 2, β , κ -caséine, considérées comme précurseur de peptides bioactifs avec des protéines de lactosérum (α -lactalbumine, b-lactoglobuline). Ces protéines sont hydrolysées en plusieurs petites chaînes d'acides aminés don't quelques-unes présentent des propriétés bénéfiques pour la santé. Dans les produits laitiers, les BL sont les micro-organismes les plus importants utilisés comme starter culture. De nombreux peptides bénéfiques pour la santé se forment pendant la fermentation. En cas d'affinage du fromage, des microbes non starter (BL et levure) sont impliqués, qui contribuent davantage à la protéolyse des protéines du lait. Outre les enzymes microbiennes, les enzymes du lait, la plasmine et l'acide. Les protéases agissent également sur la caséine β et α S1 et libèrent de petits peptides. Cathepsine D et protéinases de l'enveloppe cellulaire sécrétées par les

espèces thermophiles *Lactobacilli* hydrolysent la caséine Rs1 et la caséine α dans le fromage emmental (Rai et KA, 2021).

3.2.2 Légumineuses fermentées

Contrairement au lait, les légumineuses sont fermentées avec des bactéries (*Bacillus sp.* et BL), des champignons filamenteux (*Aspergillus sp.*, *Mucor sp.* et *Rhizopus sp.*), et dans certains cas elles sont fermentées à l'aide de cultures mixtes. Parmi les légumineuses, le soja est considéré être la source de protéines la plus riche (35 à 40 %).

Dans le soja fermenté les peptides sont également libérés soit par l'hydrolyse des protéines de soja (Glycine et β -conglycine) ou produites par les microbes associés lors de la fermentation. Il est rapporté que la glycine et la β -conglycine sont les principales protéines de soja qui agissent comme précurseurs pour la plupart des peptides bioactifs isolés de soja fermenté (Yang *et al.*, 2000).

La fermentation du soja à l'aide d'une association de bactéries et de champignons filamenteux a également entraîné la production de peptides bioactifs. La fermentation en deux étapes utilisant *Rhizopus oligosporus* et *B. subtilis* augmenterait l'hydrolyse des protéines avec une teneur plus élevée en acide aspartique et en acide glutamique après fermentation. Une telle fermentation est accompagnée de nombreux petits peptides sans affecter le profil des acides aminés essentiels (Weng et Chen, 2011).

3.2.3 Poissons et de viandes fermentés

La fermentation et maturation de viande apportent plusieurs changements au produit final en changeant la composition en acides aminés, en particulier les acides aminés essentiels libres, tels que la thréonine, la valine, la leucine et la ceux à base de viande et de poisson sont fermentés de différentes manières, comme le séchage à sec, le salage, etc. La fermentation de la viande se fait principalement avec les protéines musculaires avec très peu de rapports sur la fermentation directe de fruits de mer et de saucisses avec des starter (Jemil *et al.*, 2016).

Tableau 6 : Aliments fermentés, peptides bioactifs et leurs avantages spécifiques pour la santé

Aliments fermentés	Peptide	Microbes impliqués	Propriété	Reference
Lait fermenté	VPP IPP	Lb. HelveticusLBK16H	Antihypertenseur	(Seppo et al., 2003)
Fromage Manchego	KKYNV PQL, VRYL, VRG PFP	<i>Lactobacillus, Lactococcus</i> et <i>Leuconostoc</i>	Inhibiteur de l'ECA (enzyme de conversion l'Angiotensine)	(Gomez-Ruiz et al.,2002)
Emmental	Caséine α 1 et β Fragments	<i>Endothia parasitica</i>	Immunomodulateur et antimicrobien	(Gagnaire et al., 2001)
Sauce de viande fermentée	GTP	<i>Aspergillus</i>	Antioxydante	(Ohata et al., 2016)
Doenjang	AP	<i>Bacillus subtilis</i> CSY191	Anti-cancéreux Antihypertenseur	(Kim et al., 1999)
Poisson fermenté (pekasam)	AIPHPYP IAEVFLITDPK	<i>Lb. Plantarum</i> IFRPD P15	Antioxydante	(Najafian et Babji ,2018)
Soja fermenté	EDEVSFSP, SRPFNL, RSPFNL, ENPFNL	<i>Pediococcus pentosaceus</i> SDL 1409	Inhibiteur de l'ECA	(Daliri et al., 2018)

4 Enzymes fibrinolytiques dans les produits alimentaires fermentés et prévention des maladies cardiovasculaires

Les enzymes fibrinolytiques sont des agents qui dissolvent les caillots de fibrine. Les trois enzymes actuellement utilisées à ces fins comprennent l'urokinase, la streptokinase, et l'activateur de plasminogène tissulaire génétiquement modifié **(Bode et al., 1996)**.

Selon l'organisation mondiale de la santé en 2000, les maladies cardiaques sont responsables de 29 % du taux de mortalité total dans le monde. Étant donné que les maladies cardiovasculaires ont un impact majeur sur la qualité de vie d'un individu, des nombreuses recherches ont été menées dans le domaine de la prévention et du traitement des maladies. Les enzymes fibrinolytiques sont des agents qui dissolvent les caillots de fibrine. Récemment beaucoup des enzymes fibrinolytiques dérivées des aliments ont été trouvées dans divers aliments. Les enzymes fibrinolytiques peuvent être trouvées dans une grande variété d'aliments, tels que le natto japonais, le tofuyo, la sauce soja coréenne chungkook-jang et les champignons comestibles au miel. Les enzymes ont été purifiés à partir de ces aliments, et leurs propriétés physicochimiques ont été caractérisées. La pâte de crevettes fermentée s'est avérée avoir une forte activité fibrinolytique. Ces nouvelles enzymes fibrinolytiques dérivées d'aliments sont utiles pour la thérapie thrombolytique. Ils fourniront un complément aux enzymes fibrinolytiques coûteuses qui sont actuellement utilisées dans la gestion maladies cardiaques, puisque de grandes quantités d'enzymes peuvent être produites facilement et efficacement. De plus, ces enzymes ont d'importants potentiels pour l'enrichissement des aliments et les applications nutraceutiques, de sorte que leur utilisation pourrait prévenir efficacement les maladies cardiovasculaires (**Mine et al., 2005**).

La recherche indique que les régimes riches en graisses saturées, les gras trans et le sodium peuvent augmenter les risque des maladies cardiovasculaires, alors que les régimes riches en fibres solubles et les antioxydants peuvent aider à prévenir les maladies, par exemple, la consommation d'aliments contenant protéines de soja, telles que les boissons au soja et le tofu, dans un régime alimentaire faible en graisses saturées et en cholestérol est associée à un risque réduit de maladie coronarienne en abaissant le taux de cholestérol sanguin (**Arliss et Biermann, 2002**).

Les aliments contenant des fibres solubles, comme l'avoine et le psyllium, se sont avérés efficace pour abaisser le taux de cholestérol sanguin. Des études cliniques ont prouvé que les fibres alimentaires réduisent cholestérol en diminuant l'absorption des aliment le stérol et augmentant l'excrétion des acides biliaires dans le tube digestif (**Anderson et al., 2000**).

5 Les EPS des aliments fermentés et leur potentiel santé

Le rôle des EPS dans les aliments a été associé à plusieurs bienfaits pour la santé, y compris l'effet prébiotique, l'activité antioxydante, l'activité antitumorale et la réduction du cholestérol dans le sang. Les EPS ont une application dans l'industrie alimentaire pour plusieurs objectifs : diminuer l'ajout de conservateurs et améliorer la durée de conservation ; influencer la viscosité et la rhéologie ; améliorer la texture, les propriétés sensorielles, sensation en bouche, ; utiliser comme adoucissants ; comme fibres alimentaires ; comme agents de revêtement et hydratants (**Ripari, 2019**).

5.1 EPS : Synthèse et production par les micro-organismes

La biosynthèse des EPS peut se produire dans l'environnement intra- et extracellulaire en général (**tableau7**). Dans le milieu intracellulaire, la synthèse des EPS peut être divisé en trois étapes (**Donot *et al.*, 2012**) :

- Assimilation des sucres simples et transformation en dérivés nucléotidiques ;
- Assemblage de sous-unités penta saccharidiques attachées à un support lipidique ;
- Polymérisation d'unités répétitives de penta saccharides et sécrétion d'EPS dans l'environnement extracellulaire.

Tableau 7: Principaux EPS microbiens et leurs producteurs (**Celligoi *et al.*, 2021**).

Type	EPS	Monomères	Microorganismes
Homo-polysaccharides	Levan	Fructose	<i>Zymomonas mobilis</i> ; <i>Gluconoacetobacter diazotrophicus</i> ; <i>Bacillus subtilis</i> ; <i>B. phenoliresistens</i>
	Dextran	Glucose	<i>Weissella confusa</i> ; <i>Leuconostoc Mesenteroides</i> ; <i>Lactobacillus sakei</i>
	Cellulose bactérienne	Glucose	<i>Gluconacetobacter xylinus</i> ; <i>Acetobacter xylinum</i> ; <i>Komagataeibacter hansenii</i>
Hetero-Polysaccharides	Xanthane	D-glycosyl, D-mannosyl, acide D-glucuronique, acétyle et pyruvyle	<i>Xanthomonas spp.</i>
	Gélan	L-Ramnose, D-glucose et acide D-glucuronique	<i>Sphingomonas elodea</i>
	Acid hyaluronique	Acid glucuronique et N-acétylglucosamine	<i>Streptococcus zooepidemicus</i>

Les BL sont les micro-organismes les plus courants associés aux aliments fermentés (**Kook et al., 2019**). L'application d'EPS dans les aliments peut se produire par deux méthodes : in situ production ou ajouté comme ingrédient purifié. L'utilisation en tant que bio-ingrédient peut être avantageuse si elle est appliquée à une concentration connue et à un moment précis car cela pourrait générer un système plus contrôlable (**tableau 8**) (**Lynch et al., 2018**).

Tableau 8 : EPS dans les aliments fermentés

Aliments fermentés	EPS	Reference
Les produits laitiers	L'EPS améliore les caractéristiques rhéologiques, telles qu'améliorant la viscosité et la fermeté, réduisant la synérèse et augmentant les propriétés sensorielles. Indiquant que l'application d'EPS dans les produits laitiers allégés agit comme un bio-épaississant, augmentant les niveaux d'humidité et les attributs de texture de manière significative, sans l'utilisation de produits chimiques additifs.	(Andhare et al., 2015) (Patel et Prajapati, 2013)
Produits de Boulangerie et Boissons à Base de Céréales	Produits de boulangerie et boissons à base de céréales EPS contribue à augmenter la rétention d'eau de la pâte, de meilleures propriétés rhéologiques, maintien de la structure du pain, stabilité pendant la congélation, augmentation du volume du pain et moelleux de la mie et retarde le rassissement du pain, augmentant ainsi sa durée de conservation.	(Lynch et al., 2017)
Produits Végétaux	Le kimchi est un aliment végétal fermenté traditionnel en Corée et est également une source naturelle d'additifs antioxydants pour nutraceutiques et les aliments fonctionnels. Kook et al. (2019) ont révélé l'effet immunomodulateur potentiel des EPS dérivés de <i>Bacillus licheniformis</i> et <i>Leuconostoc mesenteroides</i> isolé du kimchi, suggérant que ces EPS pourraient présenter des effets anti-inflammatoires dose-dépendants .	(Juvonen et al., 2015)
Produits carnés	Produits carnés il est suggéré que l'utilisation de EPS réduit teneur en matières grasses en raison de sa capacité à couvrir les zones sans graisse sur les particules de protéines, ainsi maintenir la tartinabilité .	(Hilbig et al., 2019)

5.2 EPS et avantages pour la santé

5.2.1 Activité prébiotique

Les EPS sont considérées comme des sucres non conventionnels synthétisés pour la protection cellulaire contre les environnements défavorables. Ils ne sont pas dégradés dans le tractus gastro-intestinal et exercent ainsi leur effet prébiotique (**Paiva, 2013**). Les bactéries présentes dans l'intestin humain sont capables d'utiliser les EPS comme source de carbone et induisent par conséquent des bénéfices pour l'organisme. De plus, l'activité prébiotique des EPS peut avoir un effet immunostimulant qui augmente la réponse immunitaire de la muqueuse intestinale (**Matsuzaki et al., 2018**), et augmente l'élimination des radicaux libres grâce à l'activité antioxydante (**Hu et al., 2019**).

5.2.2 Modulation du système immunitaire

Certains auteurs ont étudié la relation entre les EPS et la réponse immunitaire et ont vérifié que les EPS modulent la réponse du système immunitaire. Des études ont montré que les EPS augmentaient la prolifération cellulaire et l'activité phagocytaire, Les EPS ont également augmenté les anticorps contre l'ovalbumine et la prolifération des lymphocytes T Balzaretto *et al.*, (2016). Les résultats suggèrent que les EPS sont une molécule sûre et efficace pour un large éventail de traitements prophylactiques et vaccins thérapeutiques (**Xiu et al., 2018**).

5.2.3 Activité antioxydante

Le stress oxydatif chez les organismes vivants est une conséquence de l'augmentation ou de l'accumulation des espèces réactives de l'oxygène, entraînant des lésions tissulaires. Les antioxydants alimentaires comprennent généralement des peptides bioactifs, des enzymes microbiennes et les polysaccharides. Selon la littérature, les EPS présentent des activités antioxydantes, anti-inflammatoires et angiogéniques (**Barbosa et al., 2010**). Ainsi que la capacité de moduler le métabolisme de micro-organismes spécifiques dans le microbiote intestinal (**Zhang et al., 2017**).

5.2.4 Activité antitumorale

Les études montrant les activités antitumorales des EPS se sont multipliées ces dernières années. Selon la littérature, les effets antitumoraux des EPS dépendent de la composition chimique, du poids moléculaire, de la composition en monosaccharides, de la structure du polymère, des chaînes latérales et du degré de ramification (**Sun et al., 2018**). En outre, les tailles modérées de polysaccharides, la présence de résidus de mannose et de glucose avec des unités répétitives sont favorables à l'activité anticancéreuse des EPS (**Li et al., 2015**).

5.2.5 Activité hypocholestérolémiant

La capacité des EPS isolés de BL à abaisser le cholestérol a été spécialement étudiée pour les β -glucanes. Le mécanisme par lequel les EPS réduisent le taux de cholestérol n'est pas complètement élucidé. Selon la littérature, les EPS pourraient se lier au cholestérol et favoriser son excrétion, ou

directement augmenter la conversion à la bile par stimulation d'un nombre accru de microbes avec l'hydrolase des sels biliaires activité, avec une diminution conséquente des niveaux de bile (**Korcz et al., 2018**).

6 Impact de la fermentation sur les facteurs antinutritionnels

La présence de facteurs antinutritionnels, ayant le potentiel de provoquer des effets indésirables sur la nutrition, ou des composés nocifs, notamment dans les légumineuses et les céréales, réduit leur valeur nutritionnelle en diminuant la biodisponibilité des protéines, des minéraux et des vitamines (**Jain et al., 2009**). Les antinutriments présents dans les légumineuses et les céréales comprennent des composés tels que les phytates, les vicines, les alcaloïdes, les oligosaccharides, les saponines, les lectines et les tanins, ainsi que l'amylase et les inhibiteurs de protéase (**figure 3**) (**Jain et al., 2009**).

Ces facteurs sont produits par les plantes pour se protéger mais aussi restreindre leur utilisation comme denrées alimentaires et aliments pour animaux. La connaissance de ces composés et la transformation des matières premières est vitale, en particulier dans les pays en développement qui dépendent principalement de régimes à base de plantes (**Soetan et Oyewole, 2009**).

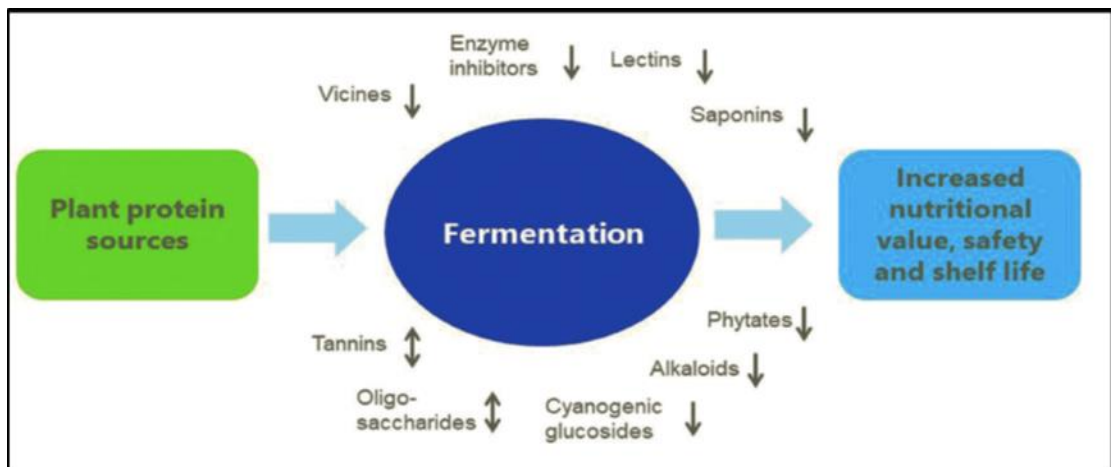


Figure 3: Impact de la fermentation sur les matières végétales (**Kahala, 2021**).

7 Prébiotiques, probiotiques et symbiotiques : une nouvelle approche intégrée dans les aliments fonctionnels

7.1 Prébiotiques, probiotiques et postbiotiques

Le terme prébiotiques a été employé au milieu des années 90 du XXe siècle par Gibson et Roberfroid, puis redéfini par divers chercheurs. La plus définition récente du prébiotique est illustrée comme un ingrédient sélectivement fermenté qui permet des changements spécifiques, à la fois dans la composition et l'activité dans le tube digestif microbiote qui confère des bénéfices au bien-être et à la santé de l'hôte (**Gibson et al., 2004**).

Le terme « probiotique » est issu des mots grecs «pro' et 'signification du bios « pour la vie » (Gismondo *et al.*, 1999). Ce terme a été utilisé pour la première fois par Lilly et Stillwell en 1965 pour décrire les substances sécrétées par un micro-organisme pour stimuler la croissance de l'autre et donc appelé soutien à la vie en améliorant naturellement la santé globale de l'organisme hôte. Les probiotiques sont définis comme des micro-organismes vivants qui, lorsqu'ils sont administrés en quantités adéquates, confèrent un avantage pour la santé à l'hôte (FAO/ WHO, 2001). Les micro-organismes vivants améliorent la santé de l'hôte grâce à leur propriété unique, comme l'adhérence au tissu épithélial de l'hôte, la résistance aux acides, l'élimination des agents pathogènes (bactériocines), production d'acides, de peroxyde d'hydrogène ainsi que l'amélioration de la microflore intestinale (Tsai *et al.*, 2019). Les souches bactériennes les plus couramment utilisées comme probiotiques sont des espèces de *Lactobacillus*, et *bifidobacterium* (Mallappa *et al.*, 2019). De nos jours, les probiotiques sont utilisés dans de nombreux aliments fermentés et non fermentés et produits laitiers.

Les postbiotiques sont définis comme des produits bactériens non viables ou des sous-produits métaboliques à partir de microbes probiotiques qui présentent des fonctions biologiques similaires dans la cellule hôte des probiotiques (Patel et Denning, 2013). Les postbiotiques sont utilisés comme alternative aux antibiotiques en raison de leur pouvoir inhibiteur et leurs propriétés contre les microbes pathogènes (Ooi *et al.*, 2015).

7. 2 Symbiotiques

Les symbiotiques sont définis comme un mélange d'un prébiotiques et probiotiques qui ont un effet bénéfique sur l'hôte en améliorant la survie et l'implantation de compléments alimentaires à base de microbes vivants dans l'intestin en stimulant sélectivement la croissance et/ou activant le métabolisme de quelques bactéries bénéfiques pour la santé (Roberfroid, 2002). La symbiotique est une fusion de « prébiotiques » et de « probiotiques » et de leur relation symbiotique entraîne une amélioration significative de la santé (Mousavi *et al.*, 2015). Les traitements de différentes maladies avec des symbiotiques sont indiquées dans le **tableau 9**.

Tableau 9: Utilisation de symbiotiques pour le traitement de différentes maladies (Lugani *et al.*,2021).

Maladies	Traitement	Résultat majeur
La maladie de Crohn	<i>Bifidobacterium longum</i> plus Synergie 1	Amélioration de la clinique Symptômes
Entérocolite	<i>Lactobacillus</i> seul ou en association avec <i>Bifidobacterium</i>	Incidence significativement réduite de la maladie
Mucosite	<i>Lactobacillus brevis</i> CD2	Efficace de manière significative réduction de l'incidence de la maladie
Rectocolite hémorragique	<i>Lactobacillus reuteri</i> ATCC 55730	Diminution de l'expression des cytokines pro-inflammatoires et augmentation de l'expression de l'IL-10 chez les enfants

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de notre travail était de caractériser les différents types d'aliments fermentés et leurs avantages pour la santé humaine, étudier la fermentation de la matrice alimentaire qui est définie comme supports complexes constitués de composants nutritionnels, pouvant être classées selon différents critères, tels que leur origine, leur texture, leur composition et leur structure. Les aliments sont produits et conservés par fermentation, qui représente un processus naturel ou spontané mené par des microorganismes afin que de nouvelles fonctions sensorielles et organoleptiques soient apportées aux aliments.

En modifiant les matrices alimentaires il est possible de modifier le goût des aliments et leur potentiel plaisir mais aussi leurs effets métaboliques et santé. L'effet matrice implique que deux aliments de même composition nutritionnelle mais avec des structures différentes n'auront pas les mêmes effets métaboliques. La fermentation est bénéfique pour les matrices alimentaires, car elle améliore la saveur, la texture, la digestibilité et la valeur nutritionnelle des aliments. Les microorganismes utilisés pour la fermentation peuvent également produire des composés utiles tels que les probiotiques, les vitamines, les enzymes et les acides organiques.

Les aliments fermentés fonctionnels sont des aliments qui prétendent être bénéfiques pour la santé au-delà de la fourniture d'une alimentation de base. La définition généralement acceptée est celle des aliments dont on peut démontrer de manière satisfaisante qu'ils ont un impact positif sur une ou plusieurs fonctions souhaitées dans l'organisme, au-delà du plein effet nutritionnel, voies pertinentes pour améliorer la santé et le bien-être et/ou réduire le risque de maladie.

En effet, les polyphénols qui sont des composés phytochimiques que l'on trouve principalement dans les fruits, les légumes, le café...etc, la fermentation améliore significativement leur biodisponibilité. Leurs propriétés bénéfiques pour la santé humaine seraient nombreuses ; antioxydants, anti-diabétiques, anticancéreuses, anti-inflammatoires, cardioprotectrices, ostéoprotectrices, neuroprotectrices, antiasthmatiques, antihypertenseurs, anti-âge, antiseptiques, hypocholestérolémiantes, hépatoprotectrices, antifongiques, antibactériennes et antivirales.

Les peptides bioactifs présents dans divers aliments fermentés présentent différentes propriétés bénéfiques pour la santé. Certaines des propriétés bénéfiques pour la santé signalées dans le monde entier concernant les peptides bioactifs dans les produits alimentaires fermentés sont des peptides antihypertenseurs qui inhibent ou abaissent l'hypertension, des peptides antioxydants qui récupèrent ou fixent les radicaux libres et préviennent plusieurs problèmes liés à l'âge, les peptides antidiabétiques et les acides aminés qui contrôlent le diabète de type II, les peptides anticancéreux, les peptides antimicrobiens qui luttent contre les microbes producteurs de toxines et les peptides immunomodulateurs qui renforcent le système immunitaire.

Les enzymes fibrinolytiques, issus du métabolisme microbien, qui dissolvent les caillots de fibrine, ont d'importants potentiels pour l'enrichissement des aliments et les applications nutraceutiques, de sorte que leur utilisation pourrait prévenir efficacement les maladies cardiovasculaires. Elles peuvent être trouvées dans une grande variété d'aliments fermentés, tels que le natto japonais, le tofuyo et la sauce soja coréenne chungkook-jang. Les enzymes ont été purifiés à partir de ces aliments, et leurs propriétés physicochimiques ont été caractérisées.

Le rôle des EPS dans les aliments a été associé à plusieurs bienfaits pour la santé, y compris l'effet prébiotique, l'activité antioxydante, l'activité antitumorale et la réduction du cholestérol dans le sang. La symbiotique est une fusion de « prébiotiques » et de « probiotiques » et de leur relation symbiotique entraîne une amélioration significative de la santé sont utilisés comme alternative aux antibiotiques en raison de leur pouvoir inhibiteur et leurs propriétés contre les microbes pathogènes.

En conclusion, l'étude des aliments fermentés, la caractérisation des microbiotes fermentaires et de leur interaction représentent une source importante d'innovation pour accompagner les transitions vers une alimentation durable plus sûre, plus saine et fonctionnelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- AIELLO, F., RESTUCCIA, D., SPIZZIRRI, U.G., CARULLO, G., LEPORINI, M. & LOIZZO, M.R. (2020). Improving kefir Bioactive properties by functional enrichment with plant and agro-food Waste Extracts. *Fermentation*, 6: 83.
- AGUILERA, J. M. (2005). Why food microstructure?. *Journal of Food Engineering*, 67(1–2), 3–11.
- AGUILERA, J.M. (2006). Seligman lecture 2005 food product engineering: building the right structures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(8) ,1147-1155.
- AL DACCACHE, M. (2019). Étude du potentiel fermentaire de la pomme libanaise et impact des procédés émergents sur la fermentation du jus en vue de l'élaboration du cidre (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Compiègne ; Université Saint-Joseph (Beyrouth). Faculté des Sciences)
- ANDHARE, P., CHAUKAN, K., DAVE, M. & PATHAK, H. (2015). Microbial Exopolysaccharides: Advances in applications and future prospects, *biotechnology*, vol. 3. pp. 1-25. In: Rupinder Tewari (Ed.). *Microbial Biotechnology*. Studium Press LLC, Delhi, India
- ANDERSON, J. W., ALLGOOD, L. D., LAWRENCE, A., ALTRINGER, L. A., JERDACK, G. R., HENGEGOLD, D. A., & al. (2000). Cholesterol Lowering effects of psyllium intake adjunctive to diet therapy in men and women with hypercholesterolemia: meta-analysis of 8 controlled trials. *American Journal of Clinical Nutrition*, 71, 472–479.
- ARLISS, R. M., & BIERMANN, C. A. (2002). Do soy isoflavones lower cholesterol, inhibit atherosclerosis and play a role in cancer Prevention. *Holistic Nursing Practice*, 16, 40–48.
- AUDREY, F. (2020). Les produits laitiers : étude des bénéfices et des risques potentiels pour la santé. *Sciences pharmaceutiques*. Dumas -03213908
- AXELSSON, L. (2005). Lactic Acid Bacteria: Classification and Physiology. In *Lactic Acid Bacteria, Microbiological and Functional Aspects Third Edition, Revised and Expanded*. Marcel Dekker, New York.

B

- BAER, A. RYBA L, GRAND M (1993) Ursachen der Entstehung von braunen Tupfen im Kâse. *Schweiz Milchw Forschung*, 22, 3- 7.
- BARBOSA, K.B.F., COSTA, N.M.B., ALFENAS, R.C.G., PAULA, S.O., MINIM, V.P.R. & BRESSAN, J. (2010). Oxidative stress: Concept, implications and modulating factors. *Revista de Nutrição*, 23: 629-643
- BARNETT, J. A. (2000). A history of research on yeasts 2: Louis Pasteur and his contemporaries, 1850–1880. *Yeast*, 16(8), 755- 771.

- BASTARD, A.** (2015). Interactions micro-organismes – bois et impact sur les propriétés physico-chimiques du vin : fermentation malolactique par le biofilm de *Oenococcus oeni* (Doctoral dissertation, Université de Bourgogne).
- BEAL, C., & HELINK, S.** (2019). Fabrication des yaourts et des laits fermentés
- BELTON, P. S., & TAYLOR, J. R.** (Eds.). (2002). Pseudo cereals and less common cereals: grain properties and utilization potential. Springer Science & Business Media.
- BENNETT, J. W.** (1998). Mycotechnology: the role of fungi in biotechnology. *Journal of biotechnology*, 66(2-3), 101-107.
- BENKERROUM, N.** (2013). Traditional fermented foods of North African countries: technology and food safety challenges with regard to microbiological risks. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(1), 54-89.
- BEUCHAT, L.R.** (1997). Traditional fermented foods, in: Doyle, M.P., Beuchat, L.R., Montville, T.J. (Eds.), *Food Microbiology -fundamentals and frontiers*. ASM press, Washington DC, pp.629-648.
- BLANDINO, A., AL-ASEERI, M. E., PANDIELLA, S. S., CANTERO, D., & WEBB, C.** (2003). Cereal-based fermented foods and beverages. *Food research international*, 36(6), 527-543.
- BODE, C., RUNGE, M., & SMALLING, R. W.** (1996). The future of thrombolysis in the treatment of acute myocardial infarction. *European Heart Journal*, 17, 55–60.

C

- CELLIGOI, M. A. P. C., BERSANETTI, G. T., BALDO, C., DA SILVA, R. T., & SILVEIRA, V. A. I.** (2021). Exopolysaccharides in Fermented Foods and Their Potential Health Benefits. In *Bioactive Compounds in Fermented Foods* (pp. 159-184). CRC Press.
- CHUNG K.-T., WONG T. Y., WEI C.-I., HUANG Y.-W. ET LIN Y.** (1998). Tannins and human Health: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 38(6), 421-464.
- CONTOR, L.** (2001). Functional Food Science in Europe. Nutrition, metabolism, and cardiovascular diseases: *NMCD*, 11(4 Suppl), 20-23.
- CROWE, K. M.** (2013). Designing functional foods with bioactive polyphenols: highlighting lessons learned from original plant matrices. *J Hum Nutr Food Sci*, 1(3), 1018.

D

- DALIRI, E.M.V., LEE, B.H., KIM, J.K. & OH, D.H.** (2018). Novel angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides from soybean protein isolates fermented by *Pediococcus pentosaceus* SDL1409. *LWT–Food Science and Technology*, 93: 88-93.

DELLA VALLE, G., SOUCHON, I., & ANTON, M. (2013). La matrice alimentaire : définition, classification et caractérisation.

DONALD A.M. (2004). Comment: food for thought. *Nature Materials* 3: 579-581.

DONOT, F., FONTANA, A., BACCOU, J.C. & SCHORR-GALINDO, S. (2012). Microbial exopolysaccharides: Main examples of synthesis, excretion, genetics and extraction. *Carbohydrate Polymères*, 87 : 951-962

DROUAULT, S., & CORTHIER, G. (2001). Effets des bactéries lactiques ingérées avec des laits fermentés sur la santé. *Vétérinaire research*, 32(2), 101-117.

DUPAS, C. (2005). Influence des protéines laitières sur le pouvoir antioxydant et la biodisponibilité des polyphénols du café (Doctoral dissertation, ENSIA (AgroParisTech)).

E

EFSA. (2016) Présomption d'innocuité reconnue (QPS), by the European Food Safety Authority. Available online

F

FAO/WHO (2001). A Report of a Joint FAO/WHO expert consultation on evaluation of health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid Bacteria, 2 pp. accessed on October 3, 2018

FARRERA, L. (2019). Analyse de la communauté bactérienne et de la diversité inter et intra spécifique des bactéries acétiques et lactiques impliquées dans la fermentation de cacao selon trois origines géographiques (Doctoral dissertation, Université Montpellier).

FARDET, A., SOUCHON, I., & DUPONT, D. (2013). Structure des aliments et effets nutritionnels. Quae Edition. 472 pages.

FDA. (2016). Generally recognized as safe (GRAS), by the U.S. Food and Drug Administration.

FESSARD, A. (2017). Recherche de bactéries lactiques autochtones capables de mener la fermentation de fruits tropicaux avec une augmentation de l'activité antioxydante (Doctoral dissertation, Université de la Réunion).

FRANZ, C. M., HUCH, M., MATHARA, J. M., ABRIOUEL, H., BENOMAR, N., REID, G., ... & HOLZAPFEL, W. H. (2014). African fermented foods and probiotics. *International Journal of Food Microbiology*, 190, 84-96.

FREITAS, R., CHUAT, V., MADEC, M.N., NERO, L.A., THIERRY, A., VALENCE, F., DE CARVALHO, A.F. (2015). Biodiversity of dairy Propionibacterium isolated from dairy farms in Minas Gerais, Brazil. *Int. J. Food Microbiol.* 203, 70-77.

G

- GAGNAIRE, V., MOLLE, D., HERROUIN, M. & LEONIL, J. (2001).** Peptides identified during Emmental cheese ripening: Origin and proteolytic systems involved. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 49(9): 4402-4413.
- GANESAN, K., & XU, B. (2017).** A critical review on polyphenols and health benefits of black soybeans. *Nutrients*, 9(5), 455.
- GIBSON, G.R., PROBERT, H.M., LOO, J.V., RASTALL, R.A. and ROBERFROID, M.B. (2004).** Dietary modulation of the human colonic microbiota: Updating the concept of prebiotics. *Nutrition research Reviews*, 17(2): 259-275.
- GISMONDO, M.R., DRAGO, L. and LOMBARDI, A. (1999).** Review of probiotics available to modify gastrointestinal flora. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 12(4): 287-292.
- GOBBETTI, M., DE ANGELIS, M., DI CAGNO, R., POLO, A. & RIZZELLO, C. G. (2020).** The Sourdough fermentation is the powerful process to exploit the potential of legumes, pseudo-cereals and milling by-products in baking industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(13):2158-2173
- GOMEZ-RUIZ, J.A., RAMOS, M. & RECIO, I. (2002).** Angiotensin-converting enzyme-inhibitory peptides in Manchego cheeses manufactured with different starter cultures. *International Dairy Journal*, 12(8): 697-706.
- GONZALEZ-GARCIA, R.A., MCCUBBIN, T., NAVONE, L., STOWERS, C., NIELSEN, L.K. & MARCELLIN, E. (2017).** Microbial propionic acid production. *Fermentation*, 3: 21.
- GUYOT, J.P. (2010).** Fermented Cereal Products. In *Fermented foods and beverages of the world* p. 448. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, USA.

H

- HAN, B.Z., ROMBOUITS, F.M., NOUT, M.J. (2001).** A Chinese fermented soybean food. *International Journal of Food Microbiology* 65, 1-10
- HILBIG, J., GISDER, J., LOEFFLER, M., PRECHTL, R.M., HERRMANN, K. & WEISS, J. (2019).** Influence of exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria on the spreadability of fat-reduced raw fermented sausages (Teewurst). *Food Hydrocolloids*, 26: 734-743.
- HO, C. W., LAZIM, A. M., FAZRY, S., ZAKI, U. K. H. H., & LIM, S. J. (2017).** Varieties, production, composition and health benefits of vinegars: A review. *Food chemistry*, 221, 1621-1630.
- HOLZAPFEL, W. H. (2002).** Appropriate starter culture technologies for small-scale fermentation in developing countries. *International journal of food microbiology*, 75(3), 197-212.

HU, X., PANG, X., WANG, P.G. & CHEN, M. (2019). Isolation and characterization of an antioxidant exopolysaccharide produced by *Bacillus* Sp. S-1 from Sichuan pickles. *Carbohydrate Polymers*, 204 : 9-16.

HUMBLOT, C. (2015). Les relations aliments-microbiotes-hôte (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat d'habilitation à diriger des recherches. Université de Montpellier 2, France, 72p).

J

JAIN, A.K., KUMAR, S. & PANWAR, J.D.S. (2009). Antinutritional factors and their detoxification in pulses – A review. *Agricultural Reviews*, 30: 64-70.

JEMIL, I., MORA, L., NASRI, R., ABDELHEDI, O., ARISTOY, M.C., HAJJI, M., NASRI, M. & TOLDRA, F. (2016). A peptidomic approach for the identification of antioxidant and ACE-inhibitory peptides in sardinelle protein hydrolysates fermented by *Bacillus subtilis* A26 and *Bacillus amyloliquefaciens* An6. *Food Research International*, 89(1): 347-358.

JUVONEN, R., HONKAPAA, K., MAINA, N.H., SHI, Q., VILJANEN, K., MAAHEIMO, H., VIRKKI, L., TENKANEN, M. & LANTTO, R. (2015). The impact of fermentation with exopolysaccharide producing lactic acid bacteria on rheological, chemical and sensory properties of pureed carrots (*Daucus carota* L.). *International Journal of Food Microbiology*, 207: 109-118.

K

KAHALA, M., MÄKINEN, S., & PIHLANTO, A. (2021). Impact of fermentation on antinutritional factors. In *Bioactive Compounds in Fermented Foods* (pp. 185-206). CRC Press.

KAMAL-ELDIN, A. (2012). The role of fermentation in providing biologically active compounds for the human organism. *Fermentation : effects on food properties*, 151-168.

KARAM, M-C. (2013). Réhydratation des protéines laitières dans un milieu complexe : Influence De l'état d'hydratation sur les propriétés texturales des gels acides.

KETIKU, A. O., & OYENUGA, V. A. (1970). Preliminary report on the carbohydrate constituents of cassava root and yam tuber. *Nigerian Journal of Science*, 4(1), 25-30.

KIM, S.H., LEE, Y.J. & KWON, D.Y. (1999). Isolation of angiotensin-converting enzyme inhibitor from Doenjang. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 31(3): 848 854.

KIMARYO, V. M., MASSAWE, G. A., OLASUPO, N. A., & HOLZAPFEL, W. H. (2000). The use of a starter culture in the fermentation of cassava for the production of “kivunde”, a traditional Tanzanian food product. *International Journal of Food Microbiology*, 56(2-3), 179-190.

KINDSTEDT PS. (2018). The history of cheese. In: *Global Cheesemaking Technology: Cheese Quality and Characteristics*, First Edition.p.3–19.

KOOK, S.Y., LEE, Y., JEONG, E.C. & KIM, S. (2019). Immunomodulatory effects of exopolysaccharides produced by *Bacillus licheniformis* and *Leuconostoc mesenteroides* isolated from Korean kimchi. *Journal of Functional Foods*, 54: 211-219

KORCZ, E., KERENYI, Z. & VARGA, L. (2018). Dietary fibres, prebiotics and exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria: Potential health benefits with special regard to cholesterol lowering effects. *Food and Function*, 9: 3057-3068.

KURTZMAN, C. P., FELL, J. W., & BOEKHOUT, T. (2011). Definition, classification and nomenclature of the yeasts. In *The yeasts* (pp. 3-5).

L

LEE, M., KIM, J. & LEE, S. (2018). Effects of fermentation On SDS-PAGE patterns, total Peptide, Isoflavone effects of fermentation On SDS-PAGE patterns, e contents and Antioxidant Activity of freeze-thawed Tofu fermented with *Bacillus subtilis*. *Food Chemistry*, 249: 60-65

LENTLE, R. G., & JANSSEN, P. W. M. (2008). Physical characteristics of digesta and their influence on flow and mixing in the mammalian intestine: a review. *Journal of Comparative Physiology B*, 178(6), 673-690.

LI, W., XIA, X., TANG, W., JI, J., RUI, X., CHEN, X., JIANG, M., ZHOU, J., ZHANG, Q. & DONG, M. (2015). Structural characterisation and anticancer activity of cell-bound exopolysaccharide from *Lactobacillus helveticus* MB2-1. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 8: 3454-3463.

LORTAL, S., EL MECHERFI, K. E., MARIOTTI, F., EUTAMÈNE, H., RUL, F., CHAMPOMIER-VERGÈS, M. C., & SAVARY-AUZÉLOUX, I. (2020). Aliments fermentés & bénéfiques santé : un défi pour la recherche. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 55(3), 136-148.

LUGANI, Y., SOOCH, B. S., & KUMAR, S. (2021). Prebiotics, Probiotics and Synbiotics: A New Integrated Approach in Functional Foods. In *Bioactive Compounds in Fermented Foods* (pp. 207-227). CRC Press.

LYNCH, K.M., COFFEY, A. & ARENDT, E.K. (2017). Exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria: Their techno-functional role and potential application in gluten-free bread products. *Food Research International*, 110: 52-61

LYNCH, K. M., ZANNINI, E., COFFEY, A., & ARENDT, E. K. (2018). Lactic acid bacteria exopolysaccharides in foods and beverages: Isolation, properties, characterization, and health benefits. *Annual review of food science and technology*, 9, 155-176.

M

- MALLAPPA, R.H., SINGH, D.K., ROKANA, N., PRADHAN, D., BATISH, V.K. & GROVER, S. (2019). Screening and selection of probiotic *Lactobacillus* strains of Indian gut origin based on assessment of desired probiotic attributes combined with principal component and heatmap analysis. *LWT –Food Science and Technology*, 105: 272-281. (not in text).
- MARTIN, V., VALERA, M. J., MEDINA, K., BOIDO, E., & CARRAU, F. (2018). Oenological impact of the *Hanseniaspora/Kloeckera* yeast genus on wines—A review. *Fermentation*, 4(3), 76.:
- MATSUZAKI, C., TAKAGAKI, C., HIGASHIMURA, Y., NAKASHIMA, Y., HOSOMI, K., KUNISAWA, J., YAMAMOTO, K. & HISA, K. (2018). Immunostimulatory effect on dendritic cells of the adjuvant-active exopolysaccharide from *Leuconostoc mesenteroides* strain NTM048. *Bioscience Biotechnology Biochemistry*, 82: 1647-1651
- MAYO, B., AMMOR, M.S., DELGADO, S., & A. ALEGRIA. (2010). Fermented milk products. In: Tamang JP, Kailasapathy K. Eds. *Fermented Foods and Beverages of the World*, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 263–288.
- MEBATION, H. K., VERBOVEN, P., HO, Q. T., VERLINDEN, B. E., & NICOLAÏ, B. M. (2008). Modelling fruit (micro) structures, why and how? *Trends in food science & technology*, 19(2), 59-66.
- MERABTI, R. (2015). Blé dur fermenté lemzeit : étude du nouveau procédé de fermentation à l'extérieur du matmor et caractérisation de l'écosystème (interactions du microbiote avec la matrice) (Doctoral dissertation, Brothers Mentouri-Constantine 1 University).
- MICHELS, A.J. AND FREI, B. (2013). Myths, artifacts, and fatal flaws: Identifying limitations and Opportunities in vitamin C research. *Nutrients*, 5: 5161-5192
- MINE, Y., WONG, A. H. K., & JIANG, B. (2005). Fibrinolytic enzymes in Asian traditional fermented foods. *Food Research International*, 38(3), 243-250
- MOUSAVI, S.M., SEIDAVI, A., DADASHBEIKI, M., NTHENGE, A.K., NAHASHON, S.N., LAUDADIO, V. AND TUFARELLI, V. (2015). Effect of a synbiotic (BiominR IMBO) on growth performance traits of broiler chickens. *European Poultry Science*, 79 : 1-15.
- MOUQUET-RIVIER, C., ICARD-VERNIÈRE, C., GUYOT, J. P., HASSANE TOU, E., ROCHETTE, I., & TRÊCHE, S. (2008). Consumption pattern, biochemical composition and nutritional value of fermented pearl millet gruels in Burkina Faso. *International journal of food sciences and nutrition*, 59(7-8), 716-729.
- MURY, E. (1989). Les protéines fongiques utilisées dans l'alimentation.

N

- NAJAFIAN, L. & BABJI, A.S. (2018). Fractionation and identification of novel antioxidant peptides from fermented fish (pekasam). *Journal of Food Measurement and Characterisation*, 12(3): 2174-2183.
- NEDOVIC, V. A., DURIEUXB, A., VAN NEDERVELDE, L., ROSSEELS, P., VANDEGANS, J., PLAISANT, A. M., & SIMON, J. P. (2000). Continuous cider fermentation with co-immobilized yeast and *Leuconostoc Oenos* cells. *Enzyme and Microbial Technology*, 26(9-10), 834-839.
- NEHME, N. (2008). Etude des interactions entre *Saccharomyces cerevisiae* et *Oenococcus oeni* : impact sur la réalisation de la fermentation malolactique en cultures séquentielles et mixtes (Doctoral dissertation).
- NOUT, M. R. (2009). Rich nutrition from the poorest—Cereal fermentations in Africa and Asia. *Food Microbiology*, 26(7), 685-692.
- NOVEL G. (1993). Les bactéries lactiques. In J.Y. Leveau & M. Bouix (eds) *Microbiologie Industrielle : les microorganismes d'intérêt industriel*. Technique & Documentation, Lavoisier, APRIA, Paris. Pp169-374.

O

- OHATA, M., UCHIDA, S., ZHOU, L. & ARIHARA, K. (2016). Antioxidant activity of fermented meat sauce and isolation of an associated antioxidant peptide. *Food Chemistry*, 194: 1034-1039.
- OOI, M.F., MAZLAN, N., FOO, H.L., LOH, T.C., MOHAMAD, R., RAHIM, R.A. AND ARIFF, A. (2015). Effects of carbon and nitrogen sources on bacteriocin-inhibitory activity of postbiotic metabolites produced by *Lactobacillus plantarum* I-UL4. *Malaysian Journal of Microbiology*, 11(2): 176-184

P

- PADMAJA, G., GEORGE, M., & MOORTHY, S. N. (1993). Detoxification of cassava during fermentation with a mixed culture inoculum. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 63(4), 473-481.
- PAIVA, I.M. (2013). Caracterização estrutural e avaliação da capacidade imunomodulatória de exopolissacarídeos produzidos por *Lactobacilos* isolados de kefir, Dissertação apresentada ao Departamento de Biologia Geral do Instituto de Ciências Biológicas da universidade Federal de Minas Gerais, p. 1-99
- PANDEY, K. B., & RIZVI, S. I. (2009). Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2, 270-278.
- PAPUC, C., GORAN, G.V., PREDESCU, C.N., NICORESCU, V. & STEFAN, G. (2017). Plant Polyphenols as antioxidant and antibacterial agents for shelf-life extension of meat and meat

products: Classification, Structures, sources, and action mechanisms. *Comprehensive Reviews of Food Science and Food Safety*, 16: 1243-1268

PARAMITHIOTIS, S. (2021). Microorganisms Associated with Food Fermentation. In *Bioactive Compounds in Fermented Foods* (pp. 3-47). CRC Press.

PATEL, A. & PRAJAPAT, J.B. (2013). Food and health applications of exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria. *Advances in Dairy Research*, 1: 1-8.

PATEL, R.M. & DENNING, P.W. (2013). Therapeutic use of prebiotics, probiotics and postbiotics to prevent necrotising enterocolitis: What is the current evidence? *Clinics in Perinatology*, 40(1): 11-25.

PICHON, M., LINA, B., & JOSSET, L. (2018). Caractérisation et impact du microbiote bactérien respiratoire sur les maladies virales. *Virologie*, 22(3), 161-172.

PIVETEAU, P., CONDON, S. & COGAN, T.M. (2000). Inability of dairy propionibacteria to grow in milk from low inocula. *Journal of Dairy Research*, 67: 65-71.

PRUST, C., HOFFMEISTER, M., LIESEGANG, H., WIEZER, A., FRICKE, W. F., EHRENREICH, A., GOTTSCHALK, G. & DEPPENMEIER, U. (2005). Complete genome sequence of the acetic acid bacterium *Gluconobacter oxydans*. *Nature Biotechnology*, 23 : 195-200.

Q

QUARANTA, J. (2007). Etude de la fermentation d'une viande maigre après un traitement de Déshydratation–Imprégnation par Immersion (Doctoral dissertation, INSFA).

R

RAI, A. K., & KA, A. A. (Eds.). (2021). *Bioactive Compounds in Fermented Foods: Health Aspects*. CRC Press.

RAI, A.K., SANJUKTA, S. & JEYARAM, K. (2017). Production of angiotensin I converting enzyme inhibitory (ACE-I) peptides during milk fermentation and its role in treatment of hypertension. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57: 2789–2800.

RIPARI, V. (2019). Techno-functional role of exopolysaccharides in cereal-based, yoghurt-like beverages. *Beverages*, 5: 16.

ROBERFROID, M. (2002). Functional food concept and its application to prebiotics. *Digestive and Liver Disease*, 34(2): 105-110.

S

SAH, B.N. P., VASILJEVIC, T., MCKECHNIE, S. & DONKOR, O.N. (2014). Effect of probiotics on Antioxidant and antimutagenic activities of crude peptide extract from yoghurt. *Food Chemistry*, 156: 264-270.

- SAMURAILATPAM, S., KUMARI, R., SAHOO, D., & RAI, A. K. (2021). Bioactive Peptides in Fermented Food Products: Production and Functionality. In *Bioactive Compounds in Fermented Foods* (pp. 95-119). CRC Press
- SAVADOGO, A., TAPI, A., CHOLLET, M., WATHELET, B., TRAORÉ, A. S., & JACQUES, P. H. (2011). Identification of surfactin producing strains in Soumbala and Bikalga fermented condiments using polymerase chain reaction and matrix assisted laser desorption/ionization-mass spectrometry methods. *International journal of food microbiology*, 151(3), 299-306.
- SAVARY-AUZELOUX, I., & RUL, F. (2021). Intérêt des aliments fermentés pour la santé. *Pratiques en Nutrition : santé et alimentation*, 17(68), 8-12.
- SENER-ASLAY, E., & TACER-CABA, Z. (2021). Polyphenols in Fermented Foods and Their Potential Health Benefits. In *Bioactive Compounds in Fermented Foods* (pp. 73-94). CRC Press.
- SEPPO, L., JAUHAINEN, T., POUSSA, T. & KORPELA, R. (2003). A fermented milk high in bioactive peptides has a blood pressure-lowering effect in hypertensive subjects. *American Journal of Clinical Nutrition*, 77(2): 326-330.
- SHARMA, R., GARG, P., KUMAR, P., BHATIA, S. K., & KULSHRESTHA, S. (2020). Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods. *Fermentation*, 6(4), 106.
- SHARMA, S., PADHI, S., KUMARI, M., RAI, A. K., & SAHOO, D. (2021). Bioactive Compounds in Fermented Foods. In *Bioactive Compounds in Fermented Foods* (pp. 48-69). CRC Press.
- SHEPARD, B. D., & GILMORE, M. S. (2002). Antibiotic-resistant enterococci: the mechanisms and dynamics of drug introduction and resistance. *Microbes and Infection*, 4(2), 215-224.
- SKRAJDA-BRDAK, M., KONOPKA, I., TAŃSKA, M. & CZAPLICKI, S. (2019). Changes in the content of free phenolic acids and antioxidative capacity of wholemeal bread in relation to cereal species and fermentation type. *European Food Research and Technology*, 245: 2247-2256
- SLAVIN, J.L., JACOBS, D., & MARQUART, L. (2001). Grain Processing and Nutrition. *Crit. Rev. Biotechnol* 21 :49–66.
- SOETAN, K. & OYEWOLE, O. (2009). The need for adequate processing to reduce the antinutritional factors in plants used as human foods and animal feeds: A review. *African Journal of Food Science*, 3: 223-232.
- STANTON, C., ROSS, R. P., FITZGERALD, G. F., & VAN SINDEREN, D. (2005). Fermented functional foods based on probiotics and their biogenic metabolites. *Current opinion in biotechnology*, 16(2), 198-203.
- STILES, M. E., & HOLZAPFEL, W. H. (1997). Lactic acid bacteria of foods and their current taxonomy. *International journal of food microbiology*, 36(1), 1-29..

SUN, N., LIU, H., LIU, S., ZHANG, X., CHEN, P., LI, W., XU, X. & TIAN, W. (2018). Purification, preliminary structure and antitumor activity of exopolysaccharide produced by streptococcus thermophiles CH9. *Molecules*, 23: 2898-2910.

T

TAMANG, J. P. (2010). Diversity of fermented foods. In *Fermented foods and beverages of the world* (pp. 53-96). CRC Press.

TEYSSIER, C., & HAMDUCHE, Y. (2016). Acetic acid bacteria. *Fermented Foods. Part I: Biochemistry and Biotechnology*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 97

TURPIN, W. (2011). Vers une évaluation des potentialités probiotique et nutritionnelle des bactéries lactiques constitutives du microbiote d'un aliment fermenté traditionnel à base de mil par une approche moléculaire (Doctoral dissertation, Montpellier 2)

TSAI, Y.L., LIN, T.L., CHANG, C.J., WU, T.R., LAI, W.F., LU, C.C. & LAI, H.C. (2019). Probiotics ,prebiotics and amelioration of diseases. *Journal of Biomedical Science*,26(3): 1-8.

V

VAN DALEN, G., NOOTENBOOM, P., VAN VLIET, L. J., VOORTMAN, L., & ESVELD, E. (2007). 3-D imaging, analysis and modelling of porous cereal products using x-ray microtomography. *Image Analysis & Stereology*, 26(3), 169-177.

VISSER, W., & SCHEFFERS, W. A. (1990). Batenburg-van der Vegte WH, van Dijken JP: Oxygen requirements of yeasts. *Appl Environ Microb*, 56, 3785-3792.

W

WENG, T.M. & CHEN, M.T. (2011). Effect of two-step fermentation by *Rhizopus oligosporus* and *Bacillus subtilis* on protein of fermented soybean. *Food Science and Technology Resource*, 17(5): 393-400.

X

XIANG, H., SUNWATERHOUSE, D., WATERHOUSE, G.I.N., CUI, C. & RUAN, Z. (2019). Fermentation-enabled Wellness foods: A fresh perspective. *Food Science and Human Wellness*,8: 203-243.

XIU, L., ZHANG, H., HU, Z., LIANG, Y., GUO, S., YANG, M., DU, R. & WANG, X. (2018). Immunostimulatory activity of exopolysaccharides from probiotic *Lactobacillus casei* WXD030 strain as a novel adjuvant in vitro and in vivo. *Food and Agricultural immunology*, 29: 1086-1105.

Y

YANG, J.H., MAU, J.L., KO, P.T. & HUANG, L.C. (2000). Antioxidant properties of fermented soybean broth. *Food Chemistry*, 71(2): 249-254.

YILDIZ, F. (2016). Development and Manufacture of Yoghurt and Other Functional Dairy Products. CRC Press, Boca Raton.

Z

ZHANG, J., ZHAO, X., JIANG, Y., ZHAO, W., GUO, T., CAO, Y., TENG, J., HAO, X., ZHAO, J. & YANG, Z. (2017). Antioxidant status and gut microbiota change in an aging mouse model as Influenced by exopolysaccharide produced by *Lactobacillus plantarum* YW11 isolated from Tibetan kefir. *Journal of Dairy Science*, 100: 6025-6041