

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة مولاي الطاهر، سعيدة

Université MOULAY Tahar, Saïda



كلية علوم الطبيعة و الحياة

N° d'Ordre

Faculté de Science de la nature et de vie

قسم البيولوجيا

Département de Biologie

Mémoire pour l'obtention du diplôme de master

En Sciences biologiques

Spécialité : microbiologie appliquée

Thème

Etude comparative entre les techniques traditionnelles et modernes de fermentation

Présenté par :

- Mlle : ZERROUKI Zahira
- Mlle : KHELIL Kheira

Encadreur

Dr : BERBER Naima

MCA Université UMTS

Examineur

Mme. SIDI IKHLEF Amel

MCB Université UMTS

présidents des jurys

Mme. BELGACEM Habiba

MCB Université UMTS

Année universitaire 2024/2025

Dédicaces

Je dédie ce travail à ceux qui m'ont toujours soutenu, encouragé et inspiré tout au long de mon parcours universitaire.

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières et leur soutien moral inestimable. Vous êtes ma plus grande source de force et de motivation.

À mes amis, compagnons de route fidèles, pour leur présence, leur écoute et leurs encouragements dans les moments difficiles comme dans les instants de joie.

À mon binôme Zahira, pour sa collaboration précieuse, son sérieux, sa patience et les efforts partagés durant toute cette aventure. Ce mémoire est aussi le fruit de notre travail commun et de notre belle complicité.

Merci à chacun de vous, ce mémoire est aussi le vôtre.

KHEIRA

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

À mes frères Nabil, Aymen et Anes, sans oublier ma chère sœur Khaoula

À mes amis Hadjer et Amani, compagnons de route fidèles, pour leur présence, leur écoute et leurs encouragements dans les moments difficiles comme dans les instants de joie.

À mon binôme Kheira, pour sa collaboration précieuse, son sérieux, sa patience et les efforts partagés durant toute cette aventure. Ce mémoire est aussi le fruit de notre travail commun et de notre belle complicité.

Merci à chacun de vous, ce mémoire est aussi le vôtre.

ZAHIRA

Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Allah, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à Madame Berber Naima, notre encadrante, pour sa disponibilité, son écoute bienveillante, ses conseils pertinents et son accompagnement tout au long de cette recherche. Sa rigueur scientifique et sa pédagogie ont été d'une grande aide et d'une inspiration constante.

Un grand merci à tous les enseignants, personnel administratif et techniciens qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce projet.

Je n'oublie pas mes parents bien-aimés, pour leur soutien inébranlable, leurs prières et leur amour constant. Je leur dois tout.

Enfin, je remercie chaleureusement mes amis pour leur encouragement, leur soutien moral et les moments de partage et de détente qui ont su alléger les périodes de stress.

À toutes et à tous, merci du fond du cœur.

Liste des abréviations

CO₂ : dioxyde de carbone

PH :Potentiel hydrogène (puissance hydrogène)

g/L.h: grammes par litre par heure

H₂ : le dihydrogène

NIRS: nearinfra Red spectroscopy, (spectroscopie proche infrarouge)

Spp : speciespluralis

SSF :Solid State Fermentation (Fermentation en milieu solide)

Liste des tableaux

Tableau 1: Méthodes de production conventionnelles (fermentation en batch, fermentation Fed-batch) et fermentation continue	19
--	----

Liste des figures

Figure 1: la fermentation alcoolique	4
Figure 2: la fermentation lactique	4
Figure 3: Schéma de production de vinaigre par fermentation acétique	5
Figure 4: la fermentation propionique	6
Figure 5: Les aliments lacto-fermentés	10
Figure 6 : Produits laitiers fermentés	10
Figure 7: Céréales fermentés	11
Figure 8: Boissons alcoolisées	11
Figure 9: Pain au levain	12
Figure 10: Vinaigres	12
Figure 11: Kombucha fermentés	13
Figure 12: Fromages à pâte dure (Emmental)	13
Figure 13: Produits à base de soja fermenté (natto)	14
Figure 14: Fromages affinés (Roquefort, Camembert)	14

Résumé

La fermentation est un procédé permettant la production d'énergie par oxydation partielle de substrats, souvent en absence d'oxygène. Bien que son rendement énergétique soit inférieur à celui de la respiration aérobie, elle joue un rôle fondamental en biotechnologie et dans l'industrie agroalimentaire. Divers microorganismes tels que les bactéries, les levures et les moisissures sont responsables de ce processus.

Il existe plusieurs types de fermentation, notamment alcoolique, lactique, acétique et propionique. Chacun de ces types dépend de conditions spécifiques comme la température, le pH ou encore la disponibilité des nutriments. Traditionnellement, la fermentation est réalisée lentement à l'aide de ferments naturels, ce qui confère aux produits des saveurs riches et complexes.

En revanche, les techniques modernes de fermentation reposent sur l'utilisation de cultures de départ standardisées et se déroulent dans des conditions strictement contrôlées. Ces méthodes permettent une meilleure maîtrise des résultats et une production plus rapide et homogène.

Ce travail compare les fermentations traditionnelles et modernes selon quatre critères : rendement, sécurité sanitaire, impact environnemental et viabilité économique. Il en ressort que les méthodes traditionnelles sont simples et peu coûteuses, mais parfois moins efficaces et moins sûres sur le plan sanitaire. Les techniques modernes, bien que plus performantes et plus sûres, engendrent des coûts plus élevés et peuvent avoir un impact écologique plus important.

En conclusion, le choix entre fermentation traditionnelle et moderne dépend du contexte et des objectifs recherchés : goût et authenticité pour les méthodes artisanales, efficacité et sécurité pour les approches industrielles.

Mots clés

Fermentation, Microorganismes, Méthodes traditionnelles, Techniques modernes, Impact environnemental, Viabilité économique.

Abstract

Fermentation is a process that allows energy production through the partial oxidation of substrates, often in the absence of oxygen. Although its energy yield is lower than that of aerobic respiration, it plays a fundamental role in biotechnology and the food industry. Various microorganisms such as bacteria, yeasts, and molds are responsible for this process.

There are several types of fermentation, including alcoholic, lactic, acetic, and propionic. Each type depends on specific conditions such as temperature, pH, and the availability of nutrients. Traditionally, fermentation is carried out slowly using natural starters, which gives products rich and complex flavors.

In contrast, modern fermentation techniques rely on standardized starter cultures and take place under strictly controlled conditions. These methods allow for better control of results and faster, more consistent production.

This work compares traditional and modern fermentation methods based on four criteria: yield, food safety, environmental impact, and economic viability. It shows that traditional methods are simple and inexpensive but sometimes less efficient and less safe in terms of hygiene. Modern techniques, although more efficient and safer, involve higher costs and may have a greater environmental impact.

In conclusion, the choice between traditional and modern fermentation depends on the context and the desired goals: taste and authenticity for artisanal methods, efficiency and safety for industrial approaches.

Keywords

Fermentation, Microorganisms, Traditional methods, Modern techniques, Environmental impact, Economic viability.

ملخص

التخمير هو عملية تنتج الطاقة من خلال الأكسدة الجزئية للركائز، غالبًا في غياب الأكسجين. وعلى الرغم من أن مردودها الطاقوي أقل من التنفس الهوائي، إلا أنها تلعب دورًا أساسيًا في التكنولوجيا الحيوية وصناعة الأغذية. وتقوم بهذه العملية كائنات دقيقة مختلفة مثل البكتيريا والخمائر والعفن.

توجد عدة أنواع من التخمير، منها الكحولي، اللبني، الخلّي، والبروبيوني. ويعتمد كل نوع منها على ظروف محددة مثل درجة الحرارة، الرقم الهيدروجيني (pH)، وتوفر العناصر الغذائية. تقليديًا، يُجرى التخمير ببطء باستخدام خمائر طبيعية، مما يمنح المنتجات نكهات غنية ومعقدة.

أما التقنيات الحديثة في التخمير، فتعتمد على مزارع بادئة موحدة وتنفذ في ظروف محكمة للغاية. وتتيح هذه الطرق تحكمًا أفضل في النتائج، بالإضافة إلى إنتاج أسرع وأكثر تجانسًا.

تُقارن هذه الدراسة بين التخمير التقليدي والحديث وفقًا لأربعة معايير: المردود، السلامة الصحية، الأثر البيئي، والجدوى الاقتصادية. ويتضح أن الطرق التقليدية بسيطة وقليلة التكلفة، لكنها قد تكون أقل فعالية وأمانًا صحيًا. بينما توفر التقنيات الحديثة أداءً أفضل ومستوى أمان أعلى، لكنها تنطوي على تكاليف مرتفعة وأثر بيئي محتمل أكبر.

في الختام، يعتمد اختيار طريقة التخمير — التقليدية أو الحديثة — على السياق والأهداف المرجوة: الطعم والأصالة للطرق الحرفية، والكفاءة والسلامة للنهج الصناعية.

الكلمات المفتاحية:

التخمير، الكائنات الدقيقة، الطرق التقليدية، التقنيات الحديثة، الأثر البيئي، الجدوى الاقتصادية.

Table des matières

Dédicace

Remerciment

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Résumé

Introduction 1

Chapitre 1 : Cadre théorique généralité sur la fermentation

1. Définition et Historique de fermentation3

2. Les principes de base de fermentation.....3

3. La classification de fermentation3

3.1. Fermentation alcoolique.....3

3.2. Fermentation lactique 4

3.3. Fermentation acétique.....5

3.4. Fermentation propionique5

3.5. Fermentation butyrique 6

4. Importance et application de fermentation dans divers domaines 6

4.1. Application dans le domaine de chimie et pharmacie 6

4.2. Application dans le domaine industriel 6

4.3. Applications environnementales7

4.4. Application dans les domaines de technologie7

Chapitre 2 : Les techniques traditionnelles de fermentation

1.1. Fermentation lactique 9

1.2. Fermentation alcoolique.....11

1.3. Fermentation acétique..... 12

1.4. Fermentation propionique 13

1.5. Fermentation fongique 14

2. Les avantages de la fermentation traditionnelle 15

2.1. Amélioration de la digestibilité	15
2.2. Enrichissement en probiotiques et bienfaits pour la flore intestinale	15
2.3. Augmentation de la biodisponibilité des nutriments	15
2.4. Conservation naturelle des aliments	15
2.5. Développement des saveurs et des arômes	15
2.6. Réduction du gaspillage alimentaire	15
3. Les limites et les défis de la fermentation traditionnelle	16
3.1. Manque de standardisation.....	16
3.2. Risque de contamination et sécurité alimentaire	16
3.3. Durée de fermentation longue et inefficacité	16
3.4. Difficulté à répondre aux normes industrielles et réglementaires	16
3.5. Perte potentielle de saveurs ou de propriétés nutritionnelles	16
Chapitre 3 : Les techniques modernes de fermentation	
1. Innovations technologiques dans la fermentation	18
1.1. Usage de biotechnologies.....	18
1.1.1. La fermentation en précision	18
1.1.2. La Nanofermentation	18
1.1.3. La fermentation continue	19
1.1.4..La fermentation SSF	20
2. Fermenteurs industriels automatisés.....	21
3. Les avantages de fermentation moderne	21
4. Contrôle précis des paramètres de fermentation moderne	22
5. Les limites des approches modernes	22
Chapitre 4 : Etude comparative entre les techniques traditionnelles et modernes de fermentation	
1. Critères de comparaison	24
1.1. Rendement et productivité	24
1.2. Qualité et sécurité des produits	24
1.3. Impact environnemental.....	25
1.4. Accessibilité économique	26
2. Résultats issus d'études comparatives de techniques de fermentation.....	26

2.1. Rendement et productivité	26
2.1. Qualité et sécurité des produits	27
2.2. Impact environnemental.....	27
2.3. Accessibilité économique	27
Conclusion et perspective.....	28

INTRODUCTION

Introduction

La fermentation est un processus biochimique qui transforme l'énergie chimique d'un substrat, généralement le glucose, en une forme d'énergie utilisable par la cellule, généralement en l'absence d'oxygène. Ce phénomène se caractérise par une oxydation partielle du substrat, produisant une faible quantité d'énergie par rapport à la respiration cellulaire aérobie. [1].

Il existe différents types de fermentation, comme la fermentation alcoolique, qui transforme les sucres en éthanol et dioxyde de carbone, utilisée pour produire des boissons alcoolisées ou faire lever la pâte dans la panification ; la fermentation lactique, qui produit de l'acide lactique et est utilisée dans la fabrication du yaourt, du fromage ou de la choucroute ; la fermentation acétique, qui transforme l'alcool en acide acétique, essentiel pour produire du vinaigre ; et la fermentation malolactique, utilisée dans la vinification [2].

Les micro-organismes responsables de la fermentation sont des bactéries, des levures et des moisissures, chacun jouant un rôle spécifique selon les conditions et objectifs de production. Par exemple, les bactéries lactiques, comme *Lactobacillus*, sont utilisées pour fermenter les produits laitiers, tandis que les levures comme *Saccharomyces cerevisiae* sont essentielles pour la fermentation alcoolique et la panification [3].

Les conditions nécessaires pour une fermentation optimale incluent la disponibilité de nutriments tels que les glucides, l'azote et le phosphate, ainsi que des paramètres environnementaux comme la température, le pH, la pression et l'agitation [4].

Dans un processus de fermentation traditionnel, on s'appuie généralement sur les levures naturelles et les ingrédients bruts. Ces méthodes, souvent artisanales, se caractérisent par leur lenteur : plus le produit est fermenté longtemps, plus ses saveurs et ses propriétés deviennent complexes. En revanche, les techniques modernes de fermentation reposent sur des conditions mieux contrôlées, des procédés technologiques avancés et l'utilisation de cultures de démarrage, afin d'optimiser le processus de maturation[5].

Les objectifs de la fermentation peuvent être la production de micro-organismes pour la croissance cellulaire, la production de métabolites tels que des alcools ou des antibiotiques, ou la dégradation des substrats dans des processus de dépollution, comme le traitement biologique des eaux usées. L'étude de la fermentation peut se faire à travers des approches microbiologiques, technologiques et mathématiques, visant à sélectionner les bons micro-organismes, choisir les bioréacteurs adaptés et modéliser les processus pour optimiser les conditions de fermentation. En somme, la fermentation est un domaine clé de la biotechnologie, ayant des applications variées et une importance capitale pour la production alimentaire, la bioénergie et d'autres industries [6].

Chapitre 1 :

Cadre théorique généralité sur la fermentation

1. Définition et Historique de fermentation

La fermentation est la modification des aliments par des microbes, champignons ou bactéries. Ces procédés ont été développés empiriquement dans diverses civilisations avant même que les microbes, ne soient connus ceux-ci provenaient de l'environnement et étaient régulés par les conditions de milieu [7].

Au XIX^e siècle, Louis Pasteur, chimiste et microbiologiste français, a remis en question la théorie de la génération spontanée, qui supposait que la fermentation résultait simplement de la décomposition naturelle des matières organiques. En 1857, il démontre que ce sont en réalité les micro-organismes, comme les levures, présents dans l'air ou sur les aliments, qui sont responsables du processus de fermentation. Il prouve aussi que ces levures peuvent vivre sans oxygène (en anaérobie). Les découvertes de Pasteur ont révolutionné la compréhension de la fermentation, ouvrant la voie à de nombreuses applications, d'abord dans l'agroalimentaire, puis, au XX^e siècle, dans la chimie, la pharmacie et l'industrie [8].

Aujourd'hui, la fermentation continue de jouer un rôle essentiel dans des secteurs variés, allant de l'industrie agroalimentaire à la biotechnologie, et reste un domaine de recherche actif, notamment pour son potentiel dans la production de biocarburants et de nouvelles molécules thérapeutiques [9].

2. Les principes de base de fermentation

Les bases de la fermentation microbienne impliquent que des micro-organismes comme les bactéries et les levures modifient les composés organiques. Ils le font en deux phases principales : la trophophase et l'idiophase. Pour réussir industriellement, il est important de bien contrôler les nutriments et la croissance de ces micro-organismes [10].

3. La classification de fermentation

3.1. Fermentation alcoolique

La fermentation alcoolique est le processus biochimique durant lequel le sucre est transformé en alcool sous l'action de levures et en l'absence d'oxygène. Elle est notamment utilisée pour la fabrication des boissons alcooliques (vin, bière...), pour la levée de la pâte en boulangerie (par le gaz carbonique dégagé) (**figure1**) ou encore la fabrication industrielle d'éthanol (par exemple pour le biocarburant) [11].

En milieu anaérobie, la levure transforme le glucose en éthanol et dioxyde de carbone selon l'équation $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$. Dans cette équation, la levure n'intervient pas directement mais joue un rôle de catalyseur. La fermentation alcoolique est un processus exothermique qui produit de la chaleur [11].

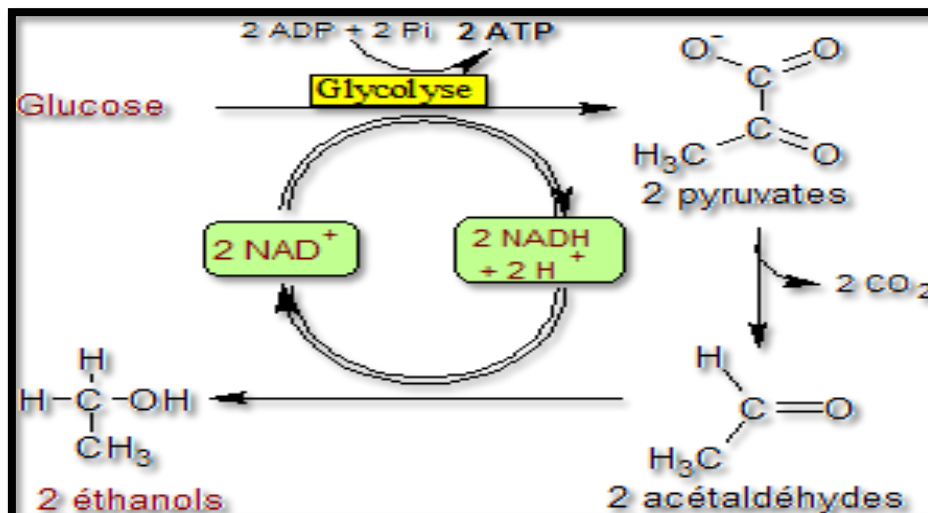


Figure 1: la fermentation alcoolique [12]

3.2. Fermentation lactique

La fermentation lactique correspond à la transformation du lactose du lait en acide lactique, (**figure2**) sous l'action de micro-organismes spécifiques appelés bactéries lactiques. Elle s'accompagne de modifications biochimiques, physico-chimiques et organoleptiques du produit. [13].

L'objectif de la fermentation lactique est tout d'abord d'augmenter la stabilité du produit, par inhibition des altérations microbiennes et enzymatiques éventuelles et, par conséquent, d'allonger sa durée de conservation. Elle permet également d'obtenir des produits sains, c'est-à-dire exempts de micro-organismes pathogènes. Enfin, elle confère aux produits obtenus des propriétés nutritionnelles et organoleptiques particulières (texture, arômes, saveur) [13].

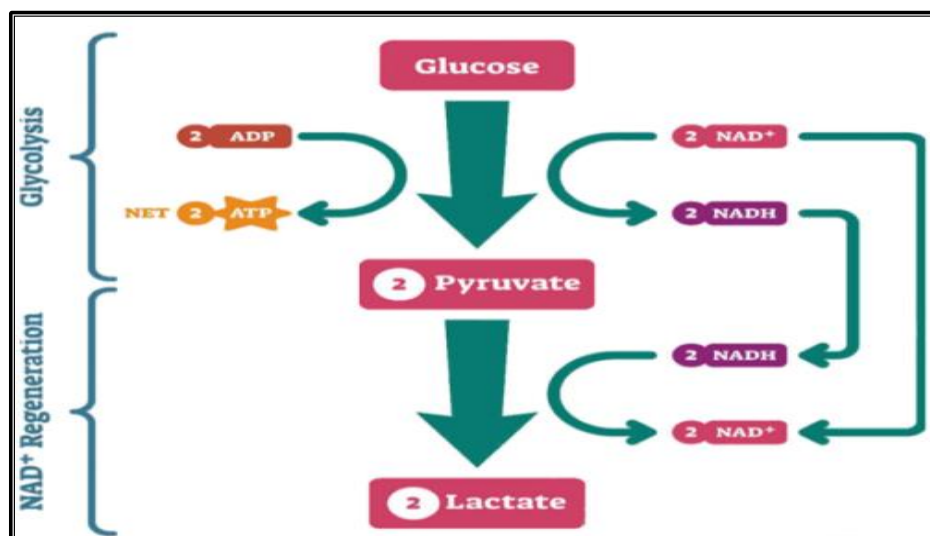


Figure 2: la fermentation lactique [14]

3.3. Fermentation acétique

La fermentation acétique est un type de fermentation dont l'éthanol issu de la fermentation alcoolique est oxydé en acétate. Cette fermentation nécessite de l'oxygène. Les processus aérobies, tels que la fermentation de l'acide acétique, sont également appelés fermentation oxydative. Par exemple, la bactérie *Acetobacter*.

Cette fermentation est aérobie, l'oxydation nécessitant l'oxygène de l'air pour avoir lieu [15].

Le vinaigre est obtenu par la fermentation acétique qui transforme en acide acétique l'alcool d'un vin sous l'effet des bactéries *Acetobacter*. C'est l'acide acétique qui donne au vinaigre son acidité caractéristique et en fait un conservateur efficace (**Figure3**).

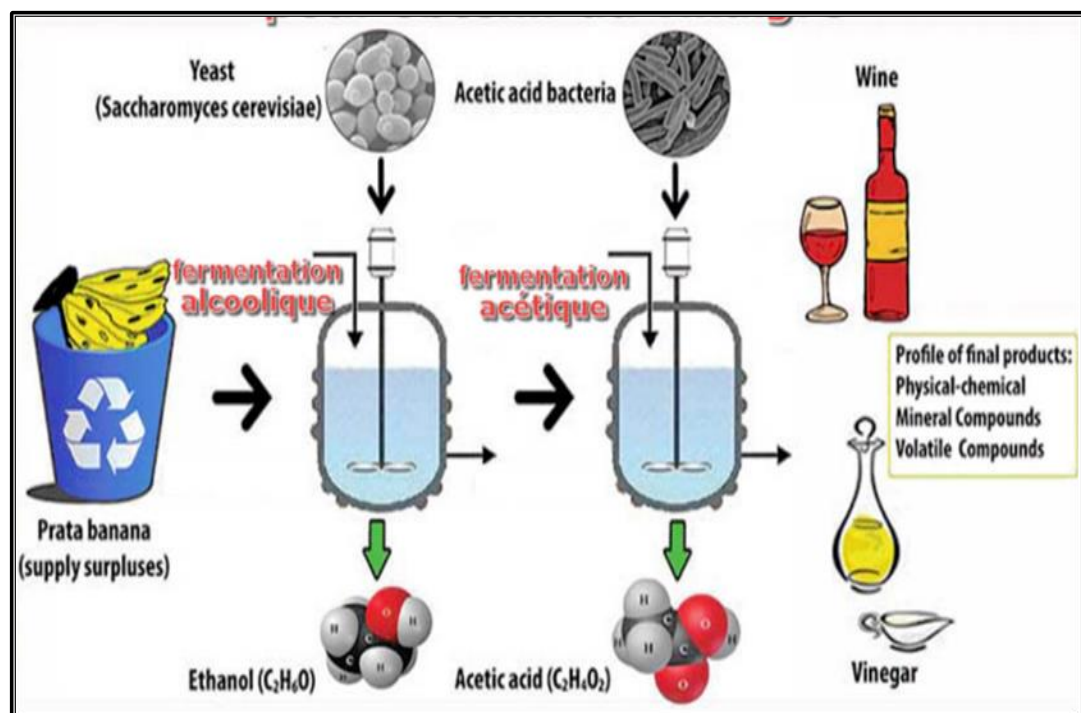


Figure 3:Schéma de production de vinaigre par fermentation acétique [16].

3.4. Fermentation propionique

La fermentation propionique transforme le lactose en acide propénoïque, acide éthanoïque (acétique), CO_2 et H_2 .

L'acide propanoïque (ou propionique) et l'acide éthanoïque (acétique) sont responsables de la flaveur des fromages à pâte cuite et le gaz carbonique responsable de l'ouverture de ces fromage (Comté, Gruyère et Emmental).

Les bactéries anaérobies qui engendrent ce type de fermentation sont les bactéries propioniques du genre *Propionibacterium* (**figure 4**) [17].

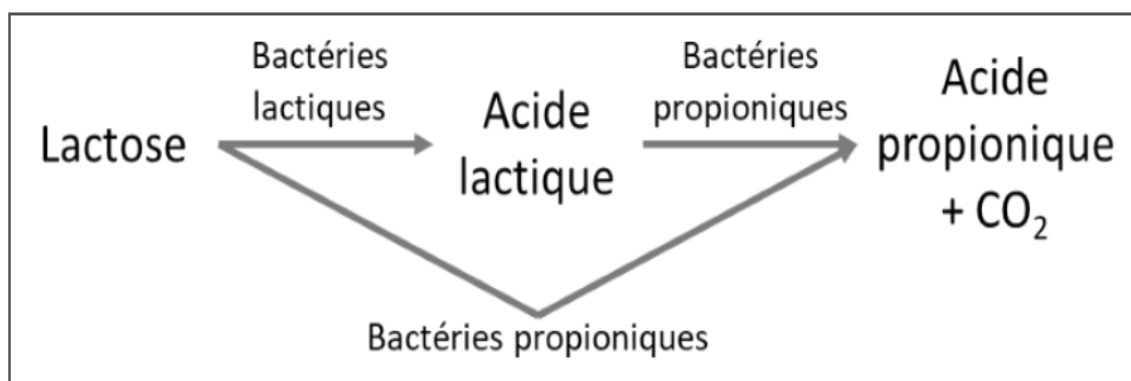


Figure 4: la fermentation propionique [18].

3.5. Fermentation butyrique

La fermentation butyrique est une fermentation intervenant dans la putréfaction et apparemment dans la digestion des mammifères herbivores dans laquelle l'acide butyrique est produit par certaines bactéries principalement anaérobies agissant sur diverses substances organiques (telles que l'acide lactique ou le beurre) [19].

Pour illustrer la fermentation butyrique, citons un exemple avec *Clostridium* : le pyruvate issu de la glycolyse est décarboxylé en acétaldéhyde. Deux acétaldéhydes donnent un acétylacétate qui est réduit en acide butyrique [19].

4. Importance et application de fermentation dans divers domaines

Si les premières utilisations de la fermentation servaient uniquement à conserver ou à transformer les aliments, elles se sont étendues à d'autres domaines [20].

4.1. Application dans le domaine de chimie et pharmacie

Dans les domaines de la chimie et de la pharmacie, les procédés de fermentation sont en concurrence avec les synthèses chimiques ; ils constituent cependant la technologie de choix pour les molécules organiques complexes ou chirales (antibiotiques, vitamines, acides organiques et aminés, polysaccharides, protéines à usage thérapeutique entre autres) [21].

4.2. Application dans le domaine industriel

Les technologies de la fermentation couvrent des domaines industriels variés. Dans le secteur alimentaire, il s'agit de la production des levures et ferments pour la production du

pain, des fromages et des boissons alcoolisées, mais aussi des arômes, de certains acides, des acides aminés et de biopolymères [22].

4.3. Applications environnementales

Certains produits issus de la fermentation sont directement pensés avec l'objectif de protéger l'environnement, d'épargner les ressources naturelles ou de se passer d'énergies fossiles [20]. Voici quelques exemples :

- Les biocarburants tels que l'éthanol et le biodiesel
- Le biogaz est une source d'énergie renouvelable qui peut être utilisée pour produire de l'électricité et de la chaleur.
- Pour **traiter** les eaux usées, on fait fermenter les polluants organiques qui sont alors transformés en produits plus simples qui pourront être facilement éliminés ou recyclés.
- La bioremédiation, qui recourt à des microorganismes spécialistes des produits polluants pour assainir des sites et sols pollués

4.4. Application dans les domaines de technologie

Les biocarburants et la production d'énergie constituent un autre domaine où la technologie de fermentation microbienne a un impact significatif. La fermentation de la biomasse par des micro-organismes tels que les levures et les bactéries permet la production de bioéthanol, une alternative durable aux combustibles fossiles. Le bioéthanol est couramment utilisé comme additif dans l'essence, tandis que des techniques de fermentation plus avancées sont développées pour produire d'autres biocarburants comme le butanol et le biodiesel. Alors que le monde recherche des alternatives aux sources d'énergie traditionnelles, la fermentation microbienne offre une solution renouvelable et respectueuse de l'environnement pour répondre à la demande croissante d'énergie propre [23].

CHAPITRE 2 :

Les techniques traditionnelles de fermentation

La fermentation traditionnelle, utilisée depuis des siècles pour conserver et enrichir les aliments, connaît un regain d'intérêt. Perçue comme un procédé naturel et doux, elle s'oppose aux méthodes de transformation industrielle. Des produits fermentés comme les yaourts, le kimchi ou le vin restent populaires. Aujourd'hui, cette méthode est valorisée pour son acceptabilité par les consommateurs et son potentiel d'innovation face aux aliments ultra-transformés [24].

La fermentation traditionnelle est une forme de fermentation indigène et spontanée qui implique la croissance naturelle de micro-organismes et de leurs métabolites. Les bactéries lactiques et les levures sont les principaux micro-organismes impliqués dans ces fermentations spontanées. Cependant, dans les condiments traditionnels issus de la fermentation alcaline, des investigations ont montré que les micro-organismes tels que *Bacillus* spp et *Staphylococcus* spp étaient prédominants [25].

Globalement, pendant la fermentation, les micro-organismes agissent sur les glucides disponibles en acides organiques, alcools, dioxyde de carbone ainsi que bactériocines [26].

Depuis que les aliments fermentés traditionnels ont retrouvé un grand intérêt dans les villes et dans le monde scientifique, de nombreuses autres propriétés fonctionnelles de ces aliments et des micro-organismes impliqués dans leur fermentation ont été révélées. Le processus de fermentation est connu pour augmenter la saveur, la qualité nutritionnelle, les effets conservateurs, la détoxification et les propriétés médicinales [27].

1. Les pratiques ancestrales de la fermentation traditionnelle

Les techniques traditionnelles de pointage peuvent jouer en faveur des fermentations naturelles, à condition d'être conduites avec très peu de levure (moins de 0,2 %) et sur des durées plus longues [28].

Ces méthodes ancestrales (dites de fermentolyse) reviennent dans les fournils. Il s'agit d'une première phase de fermentation en masse, spontanée (sans ajout de ferments) ou dirigée (avec levain et/ou levure), située avant le pétrissage [28].

Les pré-fermentations de type poolish ou avec addition de pâte fermentée doivent être dirigées avec très peu de levure (moins de 0,2 %) sur une longue durée (24 h mini), de préférence avec une farine bise et/ou un complément de ferments lactiques [29].

Il est également possible de laisser fermenter une pâte hydratée de manière spontanée pendant 24 ou 48 h à température ambiante [28].

1.1. Fermentation lactique

Processus

Les bactéries lactiques transforment les sucres en acide lactique, ce qui acidifie l'aliment et le conserve [29]. Nécessite un environnement anaérobie (sans oxygène).

Exemples

- Légumes fermentés (choucroute, kimchi, pickles) → Fermentés avec du sel et laissés à température ambiante pendant plusieurs jours (**Figure 5**).



Figure 5: Les aliments lacto-fermentés[30].

- Produits laitiers (yaourt, kéfir, fromage) → Le lait est inoculé avec des ferments et incubé à une température spécifique (**Figure 6**).



Figure 6 : Produits laitiers fermentés [31].

- Céréales fermentées (injera, ogi, uji) → La farine est mélangée avec de l'eau et laissée fermenter naturellement (**Figure 7**).



Figure 7: Céréales fermentés [32].

1.2. Fermentation alcoolique

Processus

Les levures transforment les sucres en alcool et en dioxyde de carbone, souvent en présence d'oxygène limité [33].

Exemples

- Boissons alcoolisées (vin, bière, hydromel) → Les fruits, céréales ou miel sont fermentés avec des levures naturelles ou cultivées (**Figure 8**).



Figure 8:Boissons alcoolisées [34].

- Pain au levain → La fermentation de la pâte produit du CO_2 , ce qui la fait lever naturellement (**Figure 9**).



Figure 9:Pain au levain [35].

1.3. Fermentation acétique

Processus

L'alcool est transformé en acide acétique sous l'action des bactéries en présence d'oxygène [36].

Exemples

- Vinaigre (de cidre, de vin, de riz) → Produit par fermentation secondaire de l'alcool (**Figure 10**).



Figure 10: Vinaigres [37].

- Kombucha → Une culture symbiotique de bactéries et levures (SCOBY) transforme le thé sucré en boisson fermentée (**Figure 11**).



Figure 11: Kombucha fermentés [38].

1.4. Fermentation propionique

Processus

Produit du CO_2 et de l'acide propénoïque, contribuant à la saveur et aux trous caractéristiques de certains fromages [39].

Exemples

- Fromages à pâte dure (Emmental, Gruyère) → Le lait est fermenté en plusieurs étapes avec des ferments spécifiques (**Figure 12**).



Figure 12: Fromages à pâte dure (Emmental) [40].

1.5. Fermentation fongique

Processus

Des champignons spécifiques décomposent les amidons, protéines ou lipides pour produire des saveurs uniques [41].

Exemples

- Produits à base de soja fermenté (mis, tempeh, natto) → Inoculés avec des spores fongiques et incubés à une température contrôlée (**Figure 13**).



Figure 13: Produits à base de soja fermenté (natto) [42].

- Fromages affinés (Roquefort, Camembert) → Ensemencés avec des moisissures pour leur donner leur goût et texture caractéristiques (**Figure 14**).



Figure 14: Fromages affinés (Roquefort, Camembert) [43].

2. Les avantages de la fermentation traditionnelle

Les aliments fermentés étaient initialement utilisés pour leur conservation et leur saveur, mais ils sont aujourd'hui étudiés pour leurs bienfaits sur la santé. Les bactéries lactiques, principales actrices de la fermentation, produisent des vitamines, des peptides bioactifs et éliminent certains non-nutriments [44].

Ces peptides, tels que les acides linoléiques conjugués et les bactériocines, possèdent diverses propriétés bénéfiques, notamment antioxydantes, antimicrobiennes et anti-inflammatoires. Cependant, certaines études ne confirment pas systématiquement ces bienfaits. Cet article explore donc l'impact des aliments fermentés sur la santé [44].

La fermentation traditionnelle offre de nombreux avantages sur les plans nutritionnel, sanitaire et environnemental.

2.1. Amélioration de la digestibilité

La fermentation décompose les macromolécules (protéines, glucides, lipides) en composants plus facilement assimilables par l'organisme. Par exemple, la fermentation du lait en yaourt réduit la teneur en lactose, facilitant sa digestion pour les personnes intolérantes [45].

2.2. Enrichissement en probiotiques et bienfaits pour la flore intestinale

Les aliments fermentés comme le kéfir, la choucroute ou le kimchi contiennent des probiotiques bénéfiques qui favorisent l'équilibre du microbiote intestinal et renforcent le système immunitaire. [46].

2.3. Augmentation de la biodisponibilité des nutriments

La fermentation réduit les facteurs antinutritionnels comme l'acide phytique, ce qui améliore l'absorption de minéraux essentiels tels que le fer et le zinc [47].

2.4. Conservation naturelle des aliments

Les bactéries lactiques et les levures produisent des acides organiques et des composés antimicrobiens, prolongeant ainsi la durée de conservation des aliments sans additifs artificiels [48].

2.5. Développement des saveurs et des arômes

Les processus enzymatiques améliorent le goût des aliments fermentés, ce qui explique la richesse aromatique du fromage affiné, du pain au levain ou du vin[49].

2.6. Réduction du gaspillage alimentaire

La fermentation permet d'utiliser des surplus alimentaires et de transformer des matières premières peu consommées en aliments valorisés, contribuant ainsi à une économie circulaire [50].

3. Les limites et les défis de la fermentation traditionnelle

De nombreux aliments du quotidien, comme le pain au levain, le café et le chocolat, sont produits grâce à la fermentation, un processus utilisant des micro-organismes généralement considérés comme sûrs. Bien que la fermentation prenne plus de temps que les procédés industriels, elle apporte des bienfaits pour la santé et des saveurs complexes. Avec une prise de conscience croissante sur la santé, l'intérêt pour la fermentation traditionnelle augmente, rendant des produits comme le kombucha et le pain au levain plus accessibles aux consommateurs [51].

La fermentation traditionnelle est un procédé largement utilisé pour la conservation et l'amélioration des aliments. Cependant, elle présente plusieurs limites et défis, notamment en termes de contrôle de la qualité, de sécurité alimentaire et d'efficacité.

3.1. Manque de standardisation

Les méthodes traditionnelles reposent souvent sur des pratiques empiriques, ce qui entraîne une variabilité dans la qualité des produits finaux [52]. Par exemple, les conditions environnementales (température, humidité) et la composition microbienne naturelle peuvent affecter la fermentation de manière imprévisible.

3.2. Risque de contamination et sécurité alimentaire

L'absence de contrôle strict sur les micro-organismes présents peut entraîner la prolifération de bactéries pathogènes ou de toxines [53]. Par exemple, certaines fermentations artisanales de produits laitiers ou de viandes peuvent être sujettes à des contaminations par *Listeria* ou *Salmonella*.

3.3. Durée de fermentation longue et inefficacité

Les fermentations traditionnelles prennent souvent plusieurs jours, voire semaines, pour atteindre leur plein développement, ce qui limite la production industrielle et la rentabilité économique [54].

3.4. Difficulté à répondre aux normes industrielles et réglementaires

Les produits fermentés artisanaux peuvent avoir des compositions variables qui compliquent leur conformité aux réglementations alimentaires [55]. Par exemple, les niveaux d'acidité, de sel ou d'alcool peuvent fluctuer, ce qui pose un défi pour leur commercialisation à grande échelle.

3.5. Perte potentielle de saveurs ou de propriétés nutritionnelles

La fermentation traditionnelle est souvent perçue comme supérieure en termes de goût et de bienfaits nutritionnels. Toutefois, l'absence de contrôle précis peut entraîner des pertes de nutriments ou des fluctuations de goût non désirées [56].

Chapitre 3 :

Les techniques modernes de fermentation

1. Innovations technologiques dans la fermentation

1.1. Usage de biotechnologies

La fermentation est depuis des millénaires une pierre angulaire de la production alimentaire, mais l'industrie est aujourd'hui prête à vivre une révolution technologique. L'intersection entre la précision, la biomasse et les biotransformations avancées redéfinit les possibilités dans le monde des aliments et des boissons fermentés [57].

Il existe plusieurs technologies de fermentation moderne utilisées dans l'industrie.

1.1.1. La fermentation en précision

La fermentation de précision est une technologie avancée qui utilise des micro-organismes spécifiquement sélectionnés pour produire des ingrédients fonctionnels (protéines, enzymes, arômes, pigments, etc.). Contrairement à la fermentation traditionnelle, elle permet une production ciblée et maîtrisée de composés identiques à ceux trouvés dans la nature, à partir de matières premières renouvelables. Déjà considérée comme une composante de la quatrième révolution industrielle dans l'agroalimentaire, cette méthode a des applications variées et présente un faible impact environnemental, sans recours à l'exploitation animale. [58].

La fermentation de précision ne crée pas ou très peu de sous-produits. Dans ces « usines à cellules », toutes les ressources sont réaffectées pour produire uniquement les composés désirés [58].

Procédé relativement récent, la fermentation de précision est déjà à l'origine de grandes réussites. L'insuline, employée dans la prise en charge du diabète et initialement issue d'animaux, est fabriquée par fermentation de précision depuis les années 1980. Il en va de même pour la chymosine. Cette enzyme produite par les cellules de l'estomac du veau et qui entre dans la composition de la présure des fromages, peut être fabriquée par fermentation de précision depuis les années 1990 [59].

1.1.2. La Nanofermentation

Lors de la fermentation sombre, la production d'hydrogène a lieu par la réduction des protons en molécules d'hydrogène en présence de l'enzyme hydrogénase, dans des conditions optimales (température, pH) [60]. Pendant la production de biohydrogène via la fermentation sombre, il est nécessaire de sélectionner des paramètres appropriés tels que les conditions de croissance optimales (température, pH), les micro-organismes, les substrats, les micronutriments, les éléments traces et les ions métalliques [61].

La fermentation sombre a permis d'obtenir un rendement satisfaisant et bénéfique en hydrogène dans des conditions de laboratoire. Cependant, la production de biohydrogène à grande échelle par fermentation sombre progresse lentement et manque encore de recherches fondamentales. Le rendement en hydrogène produit est relativement

faible dans la fermentation sombre. La principale raison de ce faible rendement est la formation d'acides organiques volatils, d'alcools et d'autres métabolites solubles [61].

Cela indique clairement qu'au cours de la fermentation sombre, la majeure partie de l'énergie chimique est détournée vers la production ou la conversion de sous-produits à partir des substrats organiques [61].

1.1.3. La fermentation continue

La fermentation continue est un procédé où les substrats sont introduits en continu dans un réacteur, tandis que les produits de fermentation sont extraits en permanence. Ce système permet de maintenir des conditions optimales (température, pH, oxygène, etc.) grâce à un contrôle en temps réel, favorisant des réactions prolongées et efficaces. Contrairement à la fermentation batch, où tout est ajouté et traité en une seule fois, ou à la Fed-batch (**Tableau 1**), qui consiste à ajouter du substrat au cours du processus, la fermentation continue assure une production stable sur le long terme. Elle permet aussi d'atteindre une production supérieure à la capacité du réacteur, tout en utilisant des installations plus compactes et économiques, sans besoin de mise à l'échelle importante [62].

- Les avantages et les inconvénients de fermentation continue [63].

- **Avantages**

- Processus automatisés très rentables
- Qualité constante
- Faibles coûts de personnel
- Faible risque d'infection

- **Inconvénients**

- Faible flexibilité de production
- Qualité constante des matières premières requise
- Coûts d'investissement élevés pour l'automatisation et le contrôle stérile
- Risque de mutation plus élevé
- Un risque de contamination plus élevé signifie un risque de perte de produit.

Tableau 1: Méthodes de production conventionnelles (fermentation en batch, fermentation Fed-batch) et fermentation continue [64].

Critères	Fermentation discontinue	Fermentation Fed- batch	Fermentation continue
Ajout de substrat et de milieu de culture	Tout ajout a une seule fois	Ajoute pendant la coulure	Ajouté en continu
Phase de croissance	Passe par toutes les phases	Prolonge la phase Exponentielle	Maintient la phase Exponentielle
Productivité	Faible	Moyenne	Elève
Taille de réacteur	Grande	Moyenne a grande	Petite
Flexibilité	Elevée	Moyenne	Faible
Nécessité d'un changement d'échelle	Nécessaire	Nécessaire	Aucune /très faible
Problèmes lors de l'introduction	Peut être pris en charge par les systèmes de production existant	Peut être pris en charge par les systèmes de production existants	Nécessite du temps et des couts pendant la transition du système de production

1.1.4..La fermentation SSF

La fermentation en milieu solide (FMS) est définie comme la fermentation impliquant des solides en l'absence (ou quasi-absence) d'eau libre ; cependant, le substrat doit posséder suffisamment d'humidité pour soutenir la croissance et le métabolisme des micro-organismes. [65]. La FMS stimule la croissance des micro-organismes dans la nature sur des solides humides et est considérée comme responsable du début de la technique de fermentation dans l'Antiquité [66]. Il n'est donc pas surprenant que presque tous les procédés de fermentation utilisés dans l'Antiquité aient été basés sur les principes de la FMS.

La FMS offre de nombreuses opportunités dans le traitement des résidus agro-industriels. Cela s'explique en partie par le fait que les procédés en milieu solide nécessitent moins d'énergie, produisent moins d'eaux usées et sont respectueux de l'environnement car ils résolvent le problème de l'élimination des déchets solides [67].

Plusieurs aspects importants doivent être pris en compte pour le développement de tout bioprocédé en SSF. Parmi ceux-ci figurent la sélection de micro-organismes et de substrat s'adaptés, l'optimisation des paramètres du procédé, ainsi que l'isolement et la purification du produit. Selon une classification théorique basée sur l'activité de l'eau, seuls les champignons et les levures ont été considérés comme des micro-organismes adaptés à la SSF [68].

L'avenir de la fermentation s'annonce prometteur. De nouvelles technologies comme l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique contribueront à l'améliorer. Nous verrons également une utilisation accrue de la fermentation dans la fabrication de nouveaux aliments et dans l'adaptation de la nutrition aux besoins des individus [69].

2. Fermenteurs industriels automatisés

Systèmes de contrôle : Les fermenteurs et bioréacteurs modernes sont équipés de systèmes de contrôle avancés, permettant de réguler avec précision des paramètres tels que la température, le pH, l'oxygène dissous et la vitesse d'agitation, afin d'optimiser la croissance microbienne et la formation de produits [70].

Les bioréacteurs de fermentation à grande échelle sont souvent dotés de systèmes d'automatisation et de contrôle avancés, ce qui permet d'exploiter, de surveiller et de gérer efficacement des processus de fermentation complexes dans un cadre industriel [70].

3. Les avantages de fermentation moderne

La fermentation moderne offre de nombreux avantages pour l'industrie. Elle permet une [71].

- **Augmentation de la production** : grâce à une meilleure croissance des micro-organismes, améliorant ainsi le rendement de produits comme la bière, le fromage ou les médicaments
- **Contrôle rigoureux de la qualité** : essentiel notamment dans les domaines alimentaire et pharmaceutique.
- **Réduction des coûts** : de production en optimisant l'utilisation des matières premières et en limitant les pertes.

Enfin, elle est durable, car elle utilise souvent des ressources renouvelables et réduit l'usage de produits chimiques nocifs. Ces atouts font de la fermentation avancée une solution performante, économique et respectueuse de l'environnement [71].

4. Contrôle précis des paramètres de fermentation moderne

Les contrôles de qualité sont un élément essentiel de la fermentation moderne. Nous surveillons des paramètres tels que le pH, la température et le nombre de microbes. Cela nous permet de faire des ajustements à la volée pour maintenir la fermentation sur la bonne voie. Il s'agit de s'assurer que les produits sont sûrs, homogènes et de premier ordre [67].

- La technologie de NIRS :

La technologie NIRS permet une mesure rapide et fiable contrôle de qualité in processus de fermentation.

- Des paramètres cruciaux tels que l'éthanol, les sucres, le brix, l'acide lactique, le pH et les solides totaux peuvent être mesurés avec précision.
- Contrôle de qualité est essentiel pour respecter les normes de sécurité et maximiser la productivité dans la fermentation à haut volume.
- L'utilisation d'outils d'analyse avancés comme le NIRS peut vous aider à garder une longueur d'avance dans le secteur concurrentiel des bioprocédés[72].

5. Les limites des approches modernes

Bien que la fermentation avancée offre de nombreux avantages, elle présente également quelques défis à relever [71].

Alors que les entreprises se frayent un chemin vers la fermentation à grande échelle, l'infrastructure préexistante révèle fréquemment son caractère anachronique : une relique inadaptée aux nouvelles exigences. Les machines archaïques craquent sous le poids des besoins modernes, freinant le rythme auquel l'industrie cherche à progresser [73].

La mise en place de technologies de fermentation avancée peut être coûteuse pour les petites entreprises. Cela peut être un obstacle pour les petites entreprises ou les agriculteurs qui souhaitent utiliser cette méthode pour la production de produits fermentés [71].

De plus, la complexité des techniques de fermentation avancée peut nécessiter une formation et une expertise spécialisées, ce qui peut être difficile à trouver dans certaines régions [73]

- Cout élevé

Bien que les coûts soient un problème, l'industrie travaille ensemble pour les résoudre. Cela implique d'aider les nouvelles startups et de résoudre les problèmes d'évolutivité. À mesure que de plus en plus de personnes investissent dans les aliments fermentés, nous pouvons nous attendre à voir des options plus saines et plus savoureuses [72].

Chapitre 4 :

Etude comparative entre les techniques traditionnelles et modernes de fermentation

La fermentation constitue une technique ancestrale ayant façonné la culture alimentaire et pharmaceutique à travers le monde. Depuis des millénaires, l'homme a utilisé des méthodes spontanées ou semi-contrôlées pour transformer des aliments, boissons ou produits médicaux, en exploitant la richesse de la microbiologie naturelle. Avec le développement de la science et de la biotechnologie, nous observons aujourd'hui une transition vers des processus modernes, utilisant des équipements sophistiqués, des cultures purement sélectionnées, et des paramètres strictement contrôlés [74].

Ce chapitre a pour objectif de comparer ces deux grands paradigmes en examinant leur efficacité, leur sécurité, leur impact sur l'environnement et leur viabilité économique. Comprendre ces différences permet de mieux éclairer les choix technologiques qui sont faits en fonction des contextes socio-économiques spécifiques.

1. Critères de comparaison

1.1. Rendement et productivité

Fermentation traditionnelle : Les méthodes traditionnelles, comme celles utilisées dans la production de bière acidulée, entraînent souvent une baisse des rendements en raison de la fermentation spontanée et de l'implication de diverses communautés microbiennes, ce qui peut compliquer le contrôle du processus [75].

La productivité dans ce cadre est généralement faible, limitée par l'échelle humaine et la capacité de contrôle. Par exemple, la fermentation du yaourt à domicile peut atteindre une production limitée à quelques litres par lot, avec un processus qui s'étale sur 6 à 12 heures [76].

Fermentation moderne : Les processus modernes sont caractérisés par un contrôle précis des paramètres physico- chimiques dans des installations automatisées. La fermentation industrielle par exemple, dans la fabrication de bières ou de produits probiotiques, utilise des pure cultures microbiennes (Saccharomyces cerevisiae, Lactobacillus spp.) sélectionnées pour leur capacité à produire rapidement de hauts rendements [77].

Des techniques telles que la fermentation extractive et les procédés Fed-batch ont démontré des rendements en éthanol plus élevés, des études faisant état de rendements allant jusqu'à 22,39 % et de productivités de 103,115 g/L.h[78].

1.2. Qualité et sécurité des produits

Pratiques de fermentation traditionnelles

- **Importance culturelle :** Les aliments fermentés traditionnels, tels que les boissons éthiopiennes et les produits asiatiques, sont profondément enracinés dans les pratiques culturelles et les ingrédients locaux [79]

- **Problèmes de sécurité** : Des problèmes tels que la contamination par les mycotoxines, les amines biogéniques et une hygiène inadéquate pendant la production sont généraux [80].
- **Avantages nutritionnels** : Les méthodes traditionnelles améliorent la digestibilité et la disponibilité des composés bioactifs, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire [79].

Techniques de fermentation modernes

- **Procédés contrôlés** : La fermentation moderne utilise des méthodes normalisées et des microorganismes fonctionnels pour atténuer les risques associés aux composés nocifs [79].
- **Amélioration de la qualité** : des techniques telles que le traitement à haute pression et les ferments sont utilisées pour améliorer la saveur et la sécurité, répondant ainsi aux préoccupations de santé publique [81].
- **Conformité réglementaire** : Les pratiques modernes sont souvent conformes aux normes internationales de sécurité alimentaire, garantissant ainsi une qualité et une sécurité améliorées [81].

Alors que la fermentation traditionnelle offre des avantages culturels et nutritionnels uniques, les techniques modernes améliorent la sécurité et le contrôle de la qualité, reflétant une évolution vers des systèmes de production alimentaire plus réglementés.

1.3. Impact environnemental

Approche traditionnelle

Les techniques ancestrales ont souvent une empreinte écologique réduite : elles utilisent des ressources locales, peu d'énergie, et ont un cycle de production simple [69].

Exemple, la fermentation de produits laitiers ou de corps locaux nécessite peu d'énergie supplémentaire, reposant sur leur capacité à être réalisés à température ambiante ou à température variable, souvent sans recours à l'énergie électrique ou aux combustibles fossiles.

De plus, leur importance pour la biodiversité locale et la conservation des variétés indigènes est reconnue [82]. Cependant, leur faible rendement peut impliquer une consommation plus longue ou une occupation de surface plus importante pour produire une quantité équivalente.

Approche moderne

Les techniques modernes, bien que plus énergivores, permettent une utilisation plus efficace des ressources, en augmentant la productivité par unité de surface ou de temps

[83]. Les biotechnologies permettent par exemple de produire des fermentations à partir de substrats dérivés de lignocellulose ou de déchets organiques.

Les procédés intensifs, cependant, génèrent des déchets et nécessitent une gestion rigoureuse des effluents, ce qui peut contribuer à une empreinte environnementale plus importante si la filière de traitement n'est pas bien intégrée.

1.4. Accessibilité économique

Techniques traditionnelles

L'un des principaux avantages des méthodes artisanales est leur simplicité et leur faible coût initial [84]. Ces techniques ne nécessitent pas d'équipements sophistiqués ni de compétences techniques élevées, ce qui permet aux petites communautés ou aux micro-entrepreneurs d'accéder facilement à la fermentation pour leur alimentation ou leur commerce.

Cela favorise également la conservation des savoirs locaux et la valorisation des ressources naturelles, contribuant à l'autonomisation économique locale [85].

Techniques modernes

Les investissements dans les infrastructures et la formation constituent une barrière pour leur adoption dans les pays en développement ou dans les petites entreprises. Cependant, à mesure que la technologie devient plus accessible et que la production à grande échelle réduit les coûts unitaires, ces techniques peuvent devenir économiquement viables [86].

Les mécanismes de financement, les partenariats technologiques et la formation continue sont essentiels pour permettre une transition vers des processus de fermentation modernes, tout en maintenant une rentabilité suffisante.

2. Résultats issus d'études comparatives de techniques de fermentation

2.1. Rendement et productivité

Une étude menée par Liu et al. (2018) sur la fermentation du kéfir à partir de méthodes traditionnelles par rapport à des bioréacteurs contrôlés a montré que la fermentation artisanale produisait environ 2 à 3 litres de kéfir en 24 heures, avec une variabilité intrinsèque de $\pm 25\%$ d'un lot à l'autre. En revanche, l'utilisation d'un bioréacteur contrôlé permet d'obtenir jusqu'à 20 litres en un seul cycle de fermentation, avec une variabilité inférieure à 5%. Ces résultats soulignent que la technique moderne multiplie par environ 8 à 10 la productivité et garantit une meilleure reproductibilité [87].

2.1. Qualité et sécurité des produits

Une étude comparative publiée par Ramos et al. (2020) sur la fermentation de légumes fermentés (choucroute sauvage versus choucroute réalisée en laboratoire sous conditions stériles) montre que les produits traditionnels contiennent une biodiversité microbienne riche, souvent avec des levures et bactéries bénéfiques, mais aussi des micro-organismes potentiellement pathogènes ou indésirables. La présence de *Clostridium botulinum*, par exemple, a été détectée dans 10% des lots non contrôlés, tandis qu'aucune contamination n'a été observée dans les échantillons issus de procédés modernes en environnement contrôlé. La standardisation des cultures et des conditions dans la fermentation moderne augmente ainsi la sécurité alimentaire [88].

2.2. Impact environnemental

Parveen et al. (2019) ont comparé l'impact environnemental de deux techniques de fermentation du yaourt : la méthode traditionnelle utilisant du lait local non pasteurisé, et la fermentation en laboratoire sous température contrôlée. Leur étude montre que la méthode artisanale consomme moins d'énergie (environ 0,2 kWh par litre de produit) comparée à la méthode moderne (environ 0,8 kWh par litre), principalement en raison de la nécessité de pasteuriser le lait et d'utiliser des équipements électriques. Cependant, la faible productivité des techniques artisanales entraîne une consommation accrue de ressources pour produire une même quantité de produit final, ce qui pourrait augmenter leur empreinte carbone sur l'ensemble du cycle de vie [89].

2.3. Accessibilité économique

Kumar et al. (2021) ont évalué le coût de mise en œuvre de la fermentation industrielle versus artisanale dans une région rurale indienne. Leur étude indique que l'installation d'une unité artisanale coûte en moyenne 500 dollars, tandis qu'une installation moderne pour la production à grande échelle nécessite un investissement initial supérieur à 50 000 dollars. Le coût de production par litre est ainsi environ 0,10 dollar pour la méthode artisanale, contre 0,50 dollar en mode industriel, sous réserve d'économies d'échelle. Cette différence majeure reflète que la technologie moderne est peu accessible aux petites exploitations dans les zones à faibles revenus, mais elle permet une production à grande échelle et une meilleure sécurité du produit [90].

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Les méthodes de fermentation traditionnelles et modernes sont chacune utiles et limitées pour répondre à des besoins et à des situations spécifiques. Si les voies modernes fournissent une qualité, une sécurité et une productivité bien meilleures pour la production à grande échelle, celles traditionnelles gardent des valeurs culturelles et économiques où les solutions durables sont les mieux adaptées aux ressources faibles des communautés

Les résultats des études de comparaison montrent des différences sensibles entre techniques traditionnelles et techniques modernes de fermentation. Les voies modernes fournissent une productivité et une répétabilité nettement meilleures rendant les processus plus fiables et adaptés à la production étendue. De plus, la qualité sanitaire des produits issus de fermentation moderne est mieux maîtrisée en raison de l'environnement contrôlé utilisé assurant un risque de contamination minimal.

Néanmoins, ces avantages techniques entraînent une charge environnementale forte (notamment énergétique), et un coût d'équipement initial important puisqu'il rend difficile leur installation dans les contextes ruraux ou à faibles ressources. Inversement, les méthodes traditionnelles moins performantes et plus... variables disposent d'un coût d'entrée faible et permettent de valoriser les ressources locales à faible empreinte énergétique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

1. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Fermentation.html>
2. (<http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/bitstream/123456789/1741/1/memoire.pdf>
3. (<https://www.bgene.fr/la-fermentation-la-plus-moderne-des-techniques-ancestrales/>
4. [https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/BCM/2020/cours%20pdf%20biotechnologies%20\(3%20chapitres\)%20\(2\).pdf](https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/BCM/2020/cours%20pdf%20biotechnologies%20(3%20chapitres)%20(2).pdf)
5. <https://www.foodresearchlab.com/insights/what-science-can-do/fermented-beverages-traditional-vs-modern-techniques/>
6. <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/bitstream/123456789/1741/1/memoire.pdf>
7. Marc- André selosse .(2025).qu'est-ce que la fermentation ? Muséum national histoire naturelle. <https://www.mnhn.fr/fr/qu-est-ce-que-la-fermentation>
8. Chandor,A.(2020).la fermentation : plus moderne des techniques ancestrales. BGene.
9. Smith, L., et al. (2018). Fermentation for Food and Drink: Principales and. Wiley
10. Editverse. (2024). Stratégies d'optimisation du processus de fermentation.<https://editverse.com/fr/fermentation-process-optimization-strategies/#:~:text=L'optimisation%20du%20processus%20de,l'am%C3%A9lioration%20de%20ces%20processus>
11. Céline, deluzarche. (2021).Fermentation.Futura-Sciences. <https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-fermentation-6817/>
12. Pancrat. (2013).Fermentation alcoolique. Wikimedia Commons. [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Fermentation alcoolique.png](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Fermentation_alcoolique.png)
13. Catherine BEAL, Isabelle sodini(10/06/2003).Fabrication des yaourts et des laits fermentés : La fermentation lactique. *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-bioproc%C3%A9s-et-bioproductions-tiabi/archive-1/fabrication-des-yaourts-et-des-laits-fermentes-f6315/la-fermentation-lactique-f6315niv10002.html>
14. Aquaportail. (s.d.). Fermentation lactique. Dans Dictionnaire Aquaportail. Repéré le 12 mars 2025 <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/2230/fermentation-lactique>
15. Aquaportail. (s.d.). Fermentation acétique. Aquaportail.[https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/9881/fermentation acétique](https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/9881/fermentation-acetique)
16. Université de Tunis El Manar. (n.d.). Le vinaigre est obtenu par fermentationacétique.<https://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/biologie-fermentation>

- [physiologie-vegetale/chap4b/Chapitre-2/Section-2-3.html#:~:text=Le%20vinaigre%20est%20obtenu%20par,en%20fait%20un%20conservateur%20efficace](#)
17. Claude, J. (2020). *Fermentation*. Science en Livre. <https://www.dev.scienceenlivre.org/fermentation/>
 18. ResearchGate. (s.d.). Voie de fermentation de l'acide propionique : La voie métabolique pour la production d'acide propionique. https://www.researchgate.net/figure/Propionic-acid-fermentation-pathway-The-metabolic-pathway-for-propionic-acid-production_fig3_237044293
 19. Aquaportail. (s.d.). *Fermentation butyrique*. Science en Livre. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/9914/fermentation-butyrique>
 20. Chandor, A. (2023). *La fermentation : la plus moderne des techniques ancestrales*. BGene. <https://www.bgene.fr/la-fermentation-la-plus-moderne-des-techniques-ancestrales/>
 21. Baduel, P. (2002). *Fermentations - Principales applications industrielles*. Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-bioprocenes-et-bioproductions-tiabi/archive-2/fermentations-j6003/>
 22. Baduel, P. (2002). *Fermentations - Principales applications industrielles : Conclusion*. Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-bioprocenes-et-bioproductions-tiabi/archive-2/fermentations-j6003/conclusion-j6003niv10005.html>
 23. DelveInsight. (2025). *Potential of microbial fermentation technology*. DelveInsight. <https://www.delveinsight.com/blog/potential-of-microbial-fermentation-technology?>
 24. <https://foodinnov.fr/innover-par-la-fermentation-1-3-la-fermentation-traditionnelle/#:~:text=La%20fermentation%20traditionnelle%20est%20utilis%C3%A9e,le%20but%20de%20les%20conserver>.
 25. Anihouvi, V. B., Sakyi-Dawson, E., Ayernor, G. S., & Hounhouigan, J. D. (2007). Microbiological changes in naturally fermented cassava fish (*Pseudotolithus* sp.) for lanhouin production. *International journal of foodmicrobiology*, 116(2), 287-291
 26. . Zheng, X. W., Yan, Z., Nout, M. R., Smid, E. J., Zwietering, M. H., Boekhout, T., ... & Han, B. Z. (2014). Microbiota dynamics related to environmental conditions during the fermentative production of Fen-Daqu, a Chinese industrial fermentation starter. *International journal of food microbiology*, 182, 57-62.
 27. . Wafula, E. N., Franz, C. M. A. P., Rohn, S., Huch, M., Mathara, J. M., & Trierweiler, B. (2016). Fermentation of African indigenous leafy vegetables to lower post-harvest losses, maintain quality and increase product safety. *African Journal of Horticultural Science*, 9, 1-13.
 28. <https://www.latoque.fr/fabrication/article/834722/les-bienfaits-de-la-fermentation-naturelle> Par Armand Tandou (2016)
 29. Rezac, S., Kok, C. R., Heermann, M., & Hutkins, R. (2018). Fermented foods as a dietary source of live organisms. *Frontiers in microbiology*, 9, 1785.

30. https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fobservatoire-des-aliments.fr%2Fqualite%2Fnos-amis-les-produits-lacto-fermentes&psig=AOvVaw1EN_7pb8bBzL2N2oSwOMS-&ust=1738147297841000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAMQjB1qFwoTCNj2vcqdmIsDFQAAAAAdAAAAABAJ
31. https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Aliments_ferment%C3%A9s_produits_laitiers_animaux_maison
32. https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Aliments_ferment%C3%A9s_fermentations_asiatiques_de_c%C3%A9r%C3%A9ales,_l%C3%A9gumineuses_et_variations
33. Steensels, J., & Verstrepen, K. J. (2014). Taming wild yeast: potential of conventional and nonconventional yeasts in industrial fermentations. *Annual review of microbiology*, 68(1), 61-80.
34. <https://www.aperitissimo.fr/hydromel/>
35. <https://www.istockphoto.com/photos/wild-yeast>
36. Chakravorty, S., Bhattacharya, S., Chatzinotas, A., Chakraborty, W., Bhattacharya, D., & Gachhui, R. (2016). Kombucha tea fermentation: Microbial and biochemical dynamics. *International journal of food microbiology*, 220, 63-72.
37. <https://alcofermbrew.com/fr/Culture-de-Bacteries-Acétiques-100ml-Lactoferm-p654c63c236.html>
38. <https://revolutionfermentation.com/blogs/kombucha/meilleurs-sucre-kombucha/>
39. Hettinga, D. H., & Reinbold, G. W. (1972). The propionic-acid bacteria—a review: II. Metabolism. *Journal of Food Protection*, 35(6), 358-372.
40. <https://observatoire-des-aliments.fr/sante/ferments-propioniques-stimulant-de-notre-flore-intestinale>
41. Nout, M. R., & Kiers, J. L. (2005). Tempe fermentation, innovation and functionality: update into the third millenium. *Journal of applied microbiology*, 98(4), 789-805.
42. <https://revolutionfermentation.com/fra/blogs/tempeh-soja-cereales/bienfaits-natto-science/>
43. <https://www.europe1.fr/societe/le-camembert-et-le-roquefort-sont-ils-en-voie-de-disparition-le-cnrs-sinterroge-4238186>
44. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1383355>
45. Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B., ... & Hutkins, R. (2017). Health benefits of fermented foods: microbiota and beyond. *Current opinion in biotechnology*, 44, 94-102.
46. Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., ... & Sanders, M. E. (2014). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature reviews Gastroenterology & hepatology*.
47. Hurrell, R. F. (2003). Influence of vegetable protein sources on trace element and mineral bioavailability. *The Journal of nutrition*, 133(9), 2973S-2977S.

48. Leroy, F., & De Vuyst, L. (2004). Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry. *Trends in Food Science & Technology*, 15(2), 67-78.
49. Tamang, J. P., & Kailasapathy, K. (Eds.). (2010). *Fermented foods and beverages of the world*. CRC press.
50. Rezac, S., Kok, C. R., Heermann, M., & Hutkins, R. (2018). Fermented foods as a dietary source of live organisms. *Frontiers in microbiology*, 9, 1785.
51. De Grandmaison, A. MUTAGÉNÈSE PAR INSERTION DE TRANSPOSON À HAUTE DENSITÉ CHEZ LA BACTÉRIE ESCHERICHIA COLI.
52. Tamang, J. P., Cotter, P. D., Endo, A., Han, N. S., Kort, R., Liu, S. Q., ... & Hutkins, R. (2020). Fermented foods in a global age: East meets West. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 184-217.
53. Moss, A. J. (2008). *Moss and Adams' heart disease in infants, children, and adolescents: including the fetus and young adult* (Vol. 1). Lippincott Williams & Wilkins.
54. Steinkraus, K. H. (1997). Classification of fermented foods: worldwide review of household fermentation techniques. *Food control*, 8(5-6), 311-317.
55. Torquebiau, E., Rosenzweig, C., Chatrchyan, A. M., Andrieu, N., & Khosla, R. (2018). Identifying Climate-smart agriculture research needs.
56. Battaglieri, M., Belloni, A., Chou, A., Cushman, P., Echenard, B., Essig, R., ... & McDonald, A. (2017). US cosmic visions: new ideas in dark matter 2017: community report. *arXiv preprint arXiv:1707.04591*.
57. Editverse. (n.d.). *Procédés de fermentation alimentaire traditionnels et nouveaux*. <https://editverse.com/fr/proc%C3%A9s-de-fermentation-alimentaire-traditionnels-et-nouveaux/>
58. Ennolys. *La fermentation de précision chez Ennolys*. Ennolys. <https://www.ennolys.fr/actualites/la-fermentation-de-precision-chez-ennolys/>
59. P. Sivagurunathan et al. *Effect of hydraulic retention time (HRT) on biohydrogen production from 3galactose in an up-flow anaerobic sludge blanket reactor* Int J Hydrogen Energy (2016)
60. P.C. Hallenbeck et al. *Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes* Int J Hydrogen Energy (2002)
61. G. Yang et al. *Improving mechanisms of biohydrogen production from grass using zero-valent iron nanoparticles* Bioresour Technol (2018)
62. P.C. Hallenbeck *Fermentative hydrogen production: principles, progress, and prognosis* Int J Hydrogen Energy (2009)
63. Sawano, T., & Ishiguro, R. (2025). *Continuous fermentation technology: Looking at the innovative technology that holds the key to market development for precision fermentation*. Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute. https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2025/03/27/2501btf_sawano_ishiguro_e.pdf
64. Burkert. (s.d.). *Fermentation : principes de base, processus et contrôle des gaz*. Burkert. <https://www.burkert-usa.com/en/service-support/knowledge-center/glossary/fermentation-basic-principles-processes-and-gas-control>

65. Pandey, A. (1992). Recent process developments in solid-state fermentation. *Process Biochemistry*, 27(2), 109–117.
66. Yang, X. X., Li, X. G., Chen, H., & Lin, Y. (2001). Bioconversion of corn straw by coupling ensiling and solid-state fermentation. *BioresourceTechnology*, 78(3), 277–280.
67. Yang, X. X., Chen, H., Gao, H., & Li, Z. (2001). Bioconversion of corn straw by coupling ensiling and solid-state fermentation. *BioresourceTechnology*, 78(3), 277–280. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00024-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00024-4)
68. Shanghai RitaiMedicine Equipment projectco.,Ltd.(n.d).bioréacteur Fermenter automatique .RITAI. <http://ritaibioreactor.com/fr/produit/bioreacteur-automatique>
69. Manna, M., Han, G., Seo, Y.-S., & Park, I. (2021). Evolution of food fermentation processes and the use of multi-omics in deciphering the roles of the microbiota. *Foods*, 10(11), 2861. <https://doi.org/10.3390/foods10112861>
70. RitaiBioreactor. (s.d.). Bioréacteur Fermenteur Automatique. <https://ritaibioreactor.com/fr/produit/bioreacteur-fermenter-automatique>
71. Highfield, N. (2024, 18 août). Les technologies de fermentation avancée pour l'industrie : un aperçu complet. *PlanetZero*. <https://planetzero.fr/les-technologies-de-fermentation-avancee-pour-lindustrie-un-apercu-complet/>
72. Editverse. (s.d.). *Contrôle de la qualité dans les processus de fermentation*. <https://www.editverse.com/fr/contr%C3%B4le-de-la-qualit%C3%A9-dans-les-processus-de-fermentation/>
73. . Lee Enterprises Consulting. (2024, 5 juin). *Scaling Up Precision Fermentation: Challenges and Strategies*. Lee Enterprises Consulting. <https://lee-enterprises.com/scaling-up-precision-fermentation-challenges-and-strategies>
74. Tamang, J. P., et al. (2016). Microbial diversity and safety in traditional fermented foods. *Frontiers in Microbiology*, 7, 377.
75. (Dysvik, A., La Rosa, S. L., De Rouck, G., Rukke, E.-O., Westereng, B., &Wicklund, T. (2020). Microbial Dynamics in Traditional and Modern Sour Beer Production. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(14). <https://doi.org/10.1128/AEM.00566-20>).
76. Beuchat, L. R. (1982). Utilization of traditional food fermentation processes. *Journal of Food Protection*, 45(4), 321-324.
77. Garret, R., et al. (2021). Modern biotechnologicalapproachesinfermentation. *BiotechnologyAdvances*, 39, 107498.
78. (Rofiqah, U., Widjaja, T., Altway, A., &Bramantyo, A. (2017). *Extractive Fermentation of Sugarcane Juice to Produce High Yield and Productivity of Bioethanol*. 824(1), 012063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/824/1/012063>)
79. Anal, A. K. (2019). Quality ingredients and safety concerns for traditional fermented foods and beverages from Asia: A review. *Fermentation*, 5(1), 8.
80. Widyastuti, W., Setiawan, F., Al Afandy, C., Irawan, A., Laila, A., Juliasih, N. L. G. R., ... & Setiawan, A. (2022). Antifungal agent chitoooligosaccharides derived from solid-state fermentation of shrimp shell waste by *Pseudonocardiaantitumoralis* 18D36-A1. *Fermentation*, 8(8), 353.

81. Farida, I., & Setiawan, D. (2022). Business strategies and competitive advantage: the role of performance and innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(3), 163.
82. Kwak, Y., et al. (2017). Microbial diversity in traditional fermented foods. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1530.
83. Liu, B., et al. (2022). Environmental impacts of large-scale fermentation. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128776.
84. Gupta, S., et al. (2018). Traditional fermentation practices in rural India. *Food Science and Technology*, 4(2), 89-97.
85. Chaudhury, S., et al. (2019). Socioeconomic impact of traditional fermentation practices. *Journal of Rural Studies*, 65, 30-40.
86. Kumar, P., et al. (2021). Economics of industrial fermentation technologies. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 48(5), 377-386.
87. Liu, Y., Zhang, H., & Wu, Q. (2018). Comparison of traditional and controlled fermentation processes of kefir: yield, microbiological safety, and sensory profile. *Food Microbiology*, 74, 124-130.
88. Ramos, M., Oliveira, J., & Costa, P. (2020). Safety assessment of spontaneous versus controlled fermentation of vegetables. *Journal of Food Safety*, 40(3), e12749.
89. Parveen, S., Kumar, S., & Singh, R. (2019). Environmental impact assessment of traditional versus modern fermentation processes. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1156-1165.
90. Kumar, P., Mehta, S., & Sharma, N. (2021). Economic analysis of small-scale artisanal versus industrial fermentation technologies in rural India. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 41(2), 221-234.