الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

N° Réf : ……

Université El Moudjahid Abdelhafid BOUSSOUF- Mila

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Biologiques et Agricoles

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Thème :

Isolement et caractérisation de bactéries lactiques à partir de produits fermentés locaux

Présenté par :

- **Cheriet Dalal**
- **Dadou Chahrazed**

Devant le jury :

Dr. Khennaoui Badis	**Prof.**	**Président**
Dr. Boukezoula Fatima	**MCA**	**Examinateur**
Dr. Ahmed Gaid Kelthoum	**MCA**	**Encadrant**

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿وَقُلِ اعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ﴾

Louange à Allah, par la grâce de qui les bonnes œuvres s'accomplissent et les efforts aboutissent. À Lui revient toute la louange, au commencement et à la fin, pour Ses bienfaits innombrables et Sa guidance.

Que la paix et les bénédictions soient sur notre Prophète Muhammad ﷺ, le maître de l'humanité, envoyé comme miséricorde pour les mondes, qui nous a enseigné la patience, la persévérance et l'excellence dans le travail, ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrante, ***Dr Ahmed Gaid K.****, pour son encadrement précieux, ses orientations pertinentes, ses conseils constructifs et sa grande patience tout au long de la réalisation de ce travail. Elle a été pour nous un véritable soutien scientifique et moral, sans jamais épargner son temps, son savoir ni ses efforts. Qu'Allah la récompense abondamment, bénisse son savoir et fasse de ses actions une source de récompense.*

Nous adressons également nos sincères remerciements à ***Professeur Khennaoui B.****, qui nous fait l'honneur de présider le jury de cette soutenance. Nous remercions aussi* ***Dr Boukezoula F.*** *d'avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury. Nous leur exprimons toute notre reconnaissance pour l'intérêt accordé à ce mémoire, ainsi que pour leurs remarques et recommandations qui contribueront à l'amélioration de ce travail.*

Nous remercions également l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours universitaire à l'Université ***Abdelhafid Boussouf – Mila****, pour leurs efforts constants, leur enseignement et leurs orientations, qui ont fortement contribué à notre développement académique.*

Nos sincères remerciements vont aussi au personnel administratif pour son accueil, son organisation, sa collaboration et les facilités mises à notre disposition, qui ont permis la réalisation de ce travail dans de bonnes conditions.

Enfin, nous rendons grâce à Allah Tout-Puissant pour l'achèvement de ce travail, et nous Le remercions pour Ses bienfaits innombrables.

Louange à Allah, Seigneur de l'univers.

Dédicace

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux,

Louange à Allah qui a illuminé mon chemin de Sa lumière et m'a accordé la force et la patience pour atteindre ce moment que j'ai tant espéré. À Lui toute la gratitude, autant qu'il convient à Sa grandeur et à l'immensité de Ses bienfaits.

***À l'âme pure de mon père**, que Dieu lui fasse miséricorde… Toi qui étais mon soutien et ma sécurité, toi qui m'as appris que le chemin ne fait pas peur tant que Dieu est avec nous. Tu es parti de ce monde, mais tu restes vivant en moi, dans mon cœur et dans mes prières. Que ce travail soit une lumière dans ta tombe et une élévation dans tes degrés au Paradis.*

***À ma chère mère**, source infinie d'amour et de tendresse… Toi dont les prières ont été ma force et ma réussite. Aucun mot ne saurait exprimer ce que tu représentes pour moi. Que Dieu te protège et te garde comme la couronne de ma vie.*

***À ma deuxième mère Dalila**, qui m'a entourée d'affection et de bienveillance… Merci d'avoir été pour moi un autre refuge, qu'Allah te récompense abondamment.*

***À mon âme sœur**, ma jumelle et sœur bien-aimée, **Bouthaïna…** Toi qui as partagé chacun de mes moments, dans la joie comme dans la peine. Avec toi, tout était plus facile et plus beau. Merci d'avoir toujours été à mes côtés.*

***À la merveilleuse Souad**, pour son aide précieuse et son soutien sincère… Ta présence dans ma vie est une véritable bénédiction.*

***À mes chères amies : Dalal, Chourouk et Amani**… Merci pour les rires, le soutien et les souvenirs inoubliables. Vous avez été une famille choisie par le cœur.*

Et à tous ceux qui occupent une place dans mon cœur sans que leurs noms ne soient écrits ici… Je vous dédie ce travail avec toute ma gratitude et mon affection.

Enfin, je dédie ce mémoire à chaque rêve qui a résisté au découragement jusqu'à devenir réalité, et à chaque cœur qui a cru qu'après l'effort vient la réussite.

Louange à Allah, toujours et à jamais.

Chahrazed

Dédicace

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux

Louange à Allah, par la grâce de qui les bonnes œuvres s'accomplissent et les efforts aboutissent, et à Lui revient toute la louange, pour Ses bienfaits innombrables et Sa guidance constante.

À Allah Tout-Puissant, je rends grâce en premier et en dernier, pour Son aide invisible, Sa miséricorde et Son soutien qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours.

***À mon cher père,** mon premier soutien dans la vie, celui qui m'a appris la force, la persévérance et la confiance en soi. Qu'Allah le protège, lui accorde une longue vie pleine de santé et de bonheur, et le bénisse dans ce monde et dans l'au-delà.*

***À ma chère mère**, cœur débordant de tendresse et source inépuisable de prières, dont les mots ont été ma paix et les invocations ma force. Qu'Allah la récompense abondamment et la garde comme une couronne sur ma tête.*

***À mon frère Houssam Eddin**, véritable pilier dans les moments difficiles, toujours présent pour m'encourager et me soutenir avec sincérité et générosité. Je lui exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance.*

***À mes sœurs Fouzia, Bouchra et Afaf**, ainsi qu'à leurs enfants, merci pour votre amour sincère et votre soutien constant, qui m'ont toujours donné la force d'avancer.*

***À mes chères amies Malak et Chahrazad**, qui ont partagé avec moi les moments de fatigue et de joie, et qui ont été un véritable soutien moral tout au long de ce chemin. Merci pour vos cœurs sincères et vos paroles encourageantes.*

Et à tous ceux que mon cœur porte sans que mon stylo ne les cite, vous restez présents dans mes prières et ma reconnaissance.

Louange à Allah, par qui s'accomplissent les bonnes œuvres.

DALAL

Résumé

Ce travail a porté sur l'isolement de bactéries lactiques présumées à partir de produits fermentés d'origine laitière et végétale, notamment le raïb de lait de chèvre, le chou-rave, la betterave et les navets lactofermentés. Sur la base de critères présomptifs, cinq isolats ont été sélectionnés : R1, R2, C, B et N.

Les isolats ont ensuite fait l'objet d'une évaluation de leurs propriétés d'intérêt technologique. Le pouvoir acidifiant a montré une diminution importante du pH après24 h d'incubation, particulièrement pour les isolats N et R1, qui ont atteint respectivement des pH de 4,34 ± 0,10 et 4,35 ± 0,15. D'autres caractères d'intérêt, tels que la production d'acétoïne et la production apparente d'exopolysaccharides, ont également été étudiés afin d'orienter la sélection des isolats les plus prometteurs. L'activité antibactérienne des isolats a été évaluée vis-à-vis de bactéries pathogènes indicatrices. Les résultats ont montré une activité inhibitrice variable selon les isolats et les souches testées. L'isolat R1 s'est distingué par l'activité la plus importante, notamment contre Staphylococcus aureus, avec une zone d'inhibition de 18,25 mm. Les autres isolats ont également montré des inhibitions variables vis-à-vis de Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa et Klebsiella pneumoniae. Les isolats R1 et N ont été testés comme candidats starters dans un essai de fabrication de fromage frais à base de lait de chèvre. Les résultats ont montré que l'isolat R1 présentait un comportement proche de celui du ferment commercial, avec un rendement fromager de 21,67 % et un pH final de 4,74 ± 0,15. Cette étude a permis d'isoler des bactéries lactiques présumées à partir de sources fermentées locales et de montrer le potentiel technologique de certains isolats pour la fabrication de fromage frais. Cependant, leur identification reste présomptive et nécessite des analyses biochimiques ou moléculaires complémentaires.

Mots clés : bactéries lactiques présumées, raïb, légumes lactofermentés, pouvoir acidifiant, fromage frais**.**

Abstract

This work focused on the isolation of presumptive lactic acid bacteria from fermented dairy and plant-based products, including goat milk raïb and lacto-fermented kohlrabi, beetroot and turnips. Based on presumptive criteria, five isolates were selected: R1, R2, C, B, and N.

The isolates were then evaluated for technologically relevant properties. The assessment of acidifying ability showed a marked decrease in pH after 24 h of incubation, particularly for isolates N and R1, which reached final pH values of 4.34 ± 0.10 and 4.35 ± 0.15, respectively. Other traits of interest, such as acetoin production and apparent exopolysaccharide production, were also investigated to guide the selection of the most promising isolates. The antibacterial activity of the isolates was assessed against pathogenic indicator strains. The results showed variable inhibitory activity depending on the isolate and the tested strain. Isolate R1 showed the strongest inhibitory activity, particularly against *Staphylococcus aureus*, with an inhibition zone of 18.25 mm. The other isolates also showed variable inhibition against *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Klebsiella pneumoniae*.

Isolates R1 and N were tested as candidate starters in an experimental production of fresh goat cheese. The results showed that isolate R1 had a performance close to that of the commercial starter, with a cheese yield of 21.67% and a final pH of 4.74 ± 0.15. This study enabled the isolation of presumptive lactic acid bacteria from local fermented sources and suggested the technological potential of some isolates for fresh cheese production. However, their identification remains presumptive and requires further biochemical and molecular analyses.

Keywords: presumptive lactic acid bacteria, raïb, lacto-fermented vegetables, acidifying ability, fresh cheese.

الملخص

تناول هذا العمل عزل بكتيريا حمض اللاكتيك المفترضة من منتجات مخمّرة ذات أصل حليبي ونباتي، شملت على وجه الخصوص الرائب المحضّر من حليب الماعز، والكرنب الساقي (جدرة)، والشمندر واللفت المخمّرين لبنيًا. وبناءً على معايير افتراضية أولية، تم اختيار خمس عزلات للدراسة، وهي R1 :وR2 وC وB وN.

خضعت هذه العزلات لتقييم بعض صفاتها ذات الأهمية التكنولوجية. أظهر تقييم القدرة على التحمض انخفاضًا ملحوظًا في قيمة الرقم الهيدروجيني بعد 24 ساعة من الحضانة، لا سيما لدى العزلتين N وR1، اللتين سجلتا على التوالي قيم pH قدرها 4.34 ± 0.10 و4.35 ± 0.15. كما تم تقييم خصائص أخرى ذات أهمية تكنولوجية، مثل إنتاج الأسيتوين والإنتاج الظاهري للسكريات المتعددة خارج الخلوية، وذلك من أجل توجيه اختيار العزلات الواعدة.

كما تم تقييم النشاط المضاد للبكتيريا لدى العزلات تجاه سلالات ممرضة مؤشّرة. أظهرت النتائج نشاطًا مثبطًا متفاوتًا بحسب العزلة والسلالة المختبرة. وقد تميزت العزلة R1 بأعلى نشاط تثبيطي، خصوصًا ضد *Staphylococcus aureus*، حيث بلغ قطر منطقة التثبيط 18.25 مم. كما أظهرت العزلات الأخرى درجات تثبيط متفاوتة تجاه *Escherichia coli* و *Pseudomonas aeruginosa* و*Klebsiella pneumoniae*.

تم اختبار العزلتين R1 و Nكمرشحتين للاستعمال كبادئات تخمير في تجربة تصنيع جبن طازج اعتمادًا على حليب الماعز. أظهرت النتائج أن أداء العزلة R1 كان قريبًا من أداء البادئ التجاري، حيث بلغ مردود الجبن 21.67%، وسُجل pH نهائي قدره 4.74 ± 0.15.

تبيّن هذه الدراسة إمكانية عزل بكتيريا حمض اللاكتيك المفترضة من مصادر مخمّرة محلية، كما تشير إلى الإمكانات التكنولوجية لبعض العزلات لاستخدامها المحتمل في صناعة الجبن الطازج. ومع ذلك، يبقى تحديد هويتها تصنيفيًا افتراضيًا، ويتطلب تأكيدًا إضافيًا بواسطة تحاليل بيوكيميائية أو جزيئية.

الكلمات المفتاحية :بكتيريا حمض اللاكتيك المفترضة؛ الرائب؛ خضروات مخمّرة لبنيًا؛ القدرة التحميضية؛ جبن طازج

Liste des figures

Figure 1. Bactéries sous forme de coques (*Streptococcus* pyogenes) et sous forme de bâtonnets (*Lactobacillus acidophilus*)..... 6
Figure 2. Arbre phylogénétique illustrant la position relative des genres de bactéries lactiques. 7
Figure 3. Voies du métabolisme du lactose chez les bactéries lactiques. **8** 11
Figure 4. Métabolisme du citrate chez les bactéries lactiques. 12
Figure 5. Voies de fermentation homolactique et hétérolactique. 14
Figure 6. Principales applications industrielles de l'acide lactique. 19
Figure 7. Principaux mécanismes associés aux fermentations lactique, alcoolique et acétique. 25
Figure 8. Principaux facteurs influençant le processus fermentaire et les caractéristiques des produits obtenus. 28
Figure 9. Protéines du lait de chèvre et bénéfices des peptides bioactifs 34
Figure 10. Concentrations moyennes des principaux nutriments dans le lait de chèvre, le lait de vache et le lait humain (par 100 g de lait) 35
Figure 11: Localisation géographique du site de collecte du lait de chèvre à Ain Fellous- Mila 39
Figure 12. Diagramme de préparation traditionnelle du Raïb à partir du lait de chèvre 40
Figure 13. Diagramme des étapes de la lactofermentation des légumes 41
Figure 14. Diagramme d'isolement des souches lactiques à partir du Raib et des saumures des légumes fermentés 43
Figure 15. Diagramme de fabrication expérimentale du fromage frais 49
Figure 16. Pouvoir acidifiant des cinq isolats 57
Figure 17. Évaluation qualitative de la production d'exopolysaccharides 59
Figure 18. Diamètres des zones d'inhibition des isolats étudiés vis-à-vis des bactéries pathogènes 60
Figure 19. Effet antagoniste des isolats contre les souches pathogènes indicatrices 61
Figure 20. Rendement fromager des différents lots expérimentaux 63

Liste des photographies

Photographie 1 : Croissance des isolats à différentes températures 52

Photographie 2 : La croissance des isolats à différentes concentrations de NaCl..... 53

Photographie 3 : Croissance des isolats à pH acide et alcalin 53

Photographie 4 : Évaluation de la thermorésistance des isolats après traitement à 63,5 °C pendant 30 min 54

Photographie 5 : Mise en évidence du profil fermentaire des isolats..... 54

Photographie 6 : Production d'acétoïne/diacétyle 58

Photographie 7 : Aspect macroscopique des caillés obtenus après égouttage des différents lots expérimentaux 63

Liste des tableaux

Tableau 1 : Niveaux de sensibilité des souches en fonction des diamètres des zones d'inhibition 47

Tableau 2 : Caractéristiques morphologiques des isolats sélectionnés 51

Tableau 3 : Récapitulatif des caractéristiques biochimiques et physiologiques des isolats ... 55

Tableau 4 : Valeurs du pH à 24 h et du pouvoir acidifiant (ΔpH) des isolats étudiés 57

Tableau 5 : Évaluation technologique des lots fromagers obtenus à partir du lait de chèvre . 62

Liste des abréviations

BL : Bactéries lactiques

H_2O_2: Peroxyde d'hydrogéne

MRS: de Man Rogosa et Sharp

NaCl: Chlorure de sodium

VP : Voges-Proskaeur

Table des matières

Résumé

Abstract

الملخص

Liste des figures

Liste des photographies

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Table des matières

Introduction

Introduction 1

Synthèse Bibliographique

Chapitre I : Les Bactéries Lactiques

I. Définition générale 5

II. Principales caractéristiques 5

II.1. Physiologie et morphologie 5

II.2. Caractéristiques de l'environnement biochimique 6

III. Classification taxonomique des bactéries lactiques 6

IV. Principaux genres des bactéries lactiques 7

IV.1. Le genre *Lactobacillus* 7

IV.2. Le genre *Lactococcus* 8

IV.3. Le genre *Leuconostoc* 8

IV.4. Le genre *Streptococcus* 8

IV.5. Le genre *Enterococcus* 9

IV.6. Les genres *Pediococcus, Aerococcus, Tetragenococcus* et *Alloiococcus* 9

IV.7. Le genre *Oenococcus* 9

IV.8. Le genre *Bifidobacterium* 9

V. Niche écologique et habitat des bactéries lactiques 10

VI. Métabolisme des bactéries lactiques 10

VI.1. Métabolisme des glucides 10
VI.2. Métabolisme protéique 11
VI.3. Métabolisme des lipides 11
VI.4. Métabolisme des acides organiques : citrate et malate 12
VII. Types de fermentation chez les bactéries lactiques 13
VII.1. Fermentation homolactique 13
VII.2. Fermentation hétérolactique 13
VIII. Facteurs influençant la croissance, la survie et la viabilité des bactéries lactiques 14
IX. Méthodes d'identification des bactéries lactiques 14
X. Composés antimicrobiens des bactéries lactiques 15
X.1. Acide lactique 15
X.2. Diacétyle 16
X.3. Peroxyde d'hydrogène 16
X.4. Réutérine 16
X.5. Bactériocines 16
XI. Intérêts et applications des bactéries lactiques 17
XI.1. Applications dans l'industrie alimentaire 17
XI.2. Biopréservation et sécurité alimentaire 17
XI.3. Intérêt probiotique et nutritionnel 18
XI.4. Applications biotechnologiques, agricoles et thérapeutiques 18
XII. Bactéries lactiques associées aux végétaux fermentés 19

Chapitre II : Les Produits Fermentés

I. Définition et généralités 22
II. Concept et importance de la fermentation 22
II.1. Intérêt technologique 22
II.2. Intérêt nutritionnel 23
III. Principaux types de fermentation 23
III.1. Fermentation lactique 23
III.2. Fermentation alcoolique 23

III.3. Fermentation acétique 24
III.4. Fermentation propionique 24
III.5. Fermentation malolactique 24
IV. Micro-organismes impliqués dans les aliments fermentés 25
IV.1. Bactéries 25
IV.2. Levures 25
IV.3. Moisissures 26
IV.4. Interactions microbiennes 26
V. Succession microbienne au cours de la fermentation 26
V.1. Flore initiale 26
V.2. Microflore dominante pendant la fermentation 26
V.3. Rôle dans la transformation alimentaire 27
VI. Facteurs influençant la fermentation 27
VI.1. Nature du substrat 27
VI.2. Température 27
VI.3. pH 27
VI.4. Oxygène 28
VI.5. Inoculum et cultures starters 28
VII. Principales catégories de produits fermentés traditionnels 29
VII.1. Produits laitiers fermentés 29
VII.2. Produits végétaux fermentés 29
VII.3. Produits céréaliers et amylacés fermentés 29
VII.4. Produits carnés et piscicoles fermentés 29
VII.5. Boissons fermentées 29
VIII. Rôle des bactéries lactiques dans les produits fermentés traditionnels 30
VIII.1. Acidification, stabilité et conservation 30
VIII.2. Qualités organoleptiques 30
VIII.3. Digestibilité et intérêt nutritionnel 30
VIII.4. Cas des produits amylacés 31

Chapitre III : Le lait de chèvre

I. Généralités 33
II. Composition physico-chimique du lait de chèvre 33
II.1. Fraction protéique 33
II.2. Fraction lipidique 34
II.3. Glucides, minéraux et vitamines 34
III. Facteurs de variation de la composition 35
IV. Flore microbienne du lait de chèvre 35
V. Intérêt nutritionnel et fonctionnel 36
VI. Aptitude technologique et transformation fermentaire 36

Partie Expérimentale

Matériel et Méthodes

I. Matériel 39
I.1. Échantillons biologiques 39
I.2. Souches pathogènes utilisées 39
II. Méthodes 40
II.1. Préparation des produits fermentés 40
II.1.1. Préparation du Raïb 40
II.1.2. Préparation des légumes lactofermentés 40
II.2. Isolement des bactéries lactiques sur milieu sélectif 42
II.3. Purification des isolats 42
II.4. Conservation des isolats 42
II.5. Caractérisation des souches des isolats 44
II.5.1. Caractérisation morphologique 44
II.5.1.1. Examen macroscopique des colonies 44
II.5.1.2. Coloration de Gram 44
II.5.1.3. Test de la catalase 44
II.5.2. Caractérisation physiologique et biochimique 44
II.5.2.1. Croissance à différentes températures 44

II.5.2.2. Croissance en présence de NaCl 45
II.5.2.3. Croissance à pH acide et alcalin 45
II.5.2.4. Thermorésistance 45
II.5.2.5. Type fermentaire 45
II.6. Recherche des caractères technologiques 45
II.6.1. Pouvoir acidifiant 45
II.6.2. Production d'acétoïne 46
II.6.3. Mise en évidence qualitative de la production d'exopolysaccharides 46
II.7. Estimation du pouvoir antibactérien 46
II.7.1. Souches indicatrices utilisées 46
II.7.2. Préparation des surnageants des isolats lactiques 46
II.7.3. Méthode de diffusion en puits 47
II.8. Évaluation du potentiel starter des isolats R1 et N en fabrication de fromage frais 47
II.9. Analyse statistique 47

Résultats et Discussion

I. Résultats 51
I.1. Isolement des bactéries lactiques 51
I.1.1. Caractérisation macroscopique et microscopique des colonies isolées 51
I.1.2. Caractérisation biochimique et physiologique 52
I.1.2.1. Recherche de la catalase 52
I.1.2.2. Croissance à différentes températures 52
I.1.2.3. Croissance en présence de NaCl 52
I.1.2.4. Croissance à pH acide et alcalin 53
I.1.2.5. Test de thermorésistance 54
I.1.2.6. Type fermentaire 54
I.1.3. Orientation phénotypique présomptive des isolats lactiques 55
I.1.4. Évaluation des propriétés technologiques des isolats sélectionnés 56
I.1.4.1. Pouvoir acidifiant 56
I.1.4.2. Production d'acétoïne 58

I.1.4.3. Mise en évidence qualitative de la production d'exopolysaccharides 58
I.1.5. Evaluation de l'activité antibactérienne..... 59
I.1.6. Évaluation du potentiel starter fromager des isolats sélectionnés 61
II. Discussion..... 64
Conclusion générale 69
Références Bibliographiques..... 70
Annexes

Introduction

Introduction

Les aliments fermentés occupent une place importante dans les pratiques alimentaires traditionnelles et modernes. Ils résultent de l'activité de microorganismes capables de transformer les constituants des matières premières en métabolites d'intérêt, notamment des acides organiques, des composés aromatiques, du dioxyde de carbone ou des substances antimicrobiennes. La fermentation permet ainsi d'améliorer la stabilité microbiologique, la conservation, la digestibilité, la texture et les qualités sensorielles des produits **(Dimidi *et al.*, 2019 ; Marco *et al.*, 2021 ; Sionek *et al.*, 2023).** Dans de nombreux produits fermentés traditionnels, les bactéries lactiques jouent un rôle central grâce à leur capacité à transformer les sucres fermentescibles en acide lactique, provoquant une baisse du pH favorable à la conservation et à l'inhibition de plusieurs microorganismes indésirables **(Axelsson, 2004 ; Ibrahim *et al.*, 2021 ; Sionek *et al.*, 2023).**

Les bactéries lactiques sont particulièrement recherchées pour leurs propriétés technologiques. Dans les produits laitiers fermentés, elles interviennent dans l'acidification du lait, la coagulation, la formation de la texture, le développement des arômes et la stabilité microbiologique du produit final. Leur capacité à produire de l'acide lactique constitue ainsi un critère majeur de sélection des cultures starters, car elle conditionne la vitesse d'acidification, la sécurité microbiologique du produit et la qualité du caillé **(Masood *et al.*, 2011 ; Şanlıbaba & Güçer, 2015 ; Ibrahim *et al.*, 2021 ; Adamu *et al.*, 2025)**.

Le lait de chèvre constitue une matrice fermentescible naturellement associée à une microflore lactique diversifiée, Iil se distingue par sa composition en protéines, en minéraux, en lipides à chaîne courte et moyenne, ainsi que par certaines particularités de sa fraction caséinique et de ses propriétés de coagulation **(Jenness, 1980 ; Clark & Mora García, 2017 ; Park *et al.*, 2017).** Par ailleurs, la microflore naturelle du lait cru de chèvre peut comprendre plusieurs genres de bactéries lactiques, dont certaines souches présentent des propriétés acidifiantes, aromatiques, protéolytiques ou antimicrobiennes intéressantes pour la fabrication de produits laitiers fermentés et de fromages **(Badis *et al.*, 2004 ; Marroki *et al.*, 2011 ; Perin *et al.*, 2014).**

Parallèlement aux matrices laitières, les légumes lactofermentés constituent également des réservoirs importants de bactéries lactiques. La fermentation lactique des végétaux est un procédé traditionnel de conservation qui repose principalement sur l'acidification progressive du milieu, limitant le développement de flores indésirables et améliorant la stabilité du produit.

Plusieurs travaux rapportent que les légumes et fruits fermentés peuvent héberger des bactéries lactiques qui peuvent présenter des capacités d'acidification, d'adaptation au sel et à l'acidité, ainsi que des activités antimicrobiennes, ce qui en fait des candidates potentielles pour des applications en fermentation ou en bioconservation alimentaire **(Tamang *et al.*, 2009 ; Di Cagno *et al.*, 2013).**

Dans ce contexte, l'isolement de bactéries lactiques autochtones à partir de produits fermentés traditionnels représente une approche intéressante pour valoriser les ressources microbiennes locales. Les matrices fermentées spontanément, qu'elles soient d'origine laitière ou végétale, peuvent constituer des niches favorables à la sélection de souches à intérêt technologique

Le présent travail s'inscrit dans cette perspective. Il vise à isoler des bactéries lactiques présumées à partir de produits fermentés d'origine laitière et végétale, en particulier le raïb de lait de chèvre, le chou-rave, la betterave et les navets lactofermentés. Les isolats obtenus sont d'abord sélectionnés sur la base de critères présomptifs classiques, puis évalués pour plusieurs propriétés d'intérêt technologique. Enfin, les isolats les plus prometteurs sont testés comme candidats starters dans un essai de fabrication de fromage frais à base de lait de chèvre. Cette démarche permet d'apprécier leur potentiel technologique, tout en tenant compte du caractère encore présomptif de leur identification, qui nécessitera des analyses biochimiques ou moléculaires complémentaires afin de confirmer leur appartenance taxonomique et leur innocuité.

Synthèse Bibliographique

Chapitre I : Les Bactéries Lactiques

I. Définition générale

Les bactéries lactiques (BL) forment un groupe de micro-organismes à Gram positif, catalase négative, non sporulants, anaérobies facultatifs ou aérotolérants, de morphologie bacillaire ou coccoïde. Elles appartiennent principalement à l'ordre des Lactobacillales, qui regroupe plusieurs familles et genres bactériens. Le principal produit de leur métabolisme saccharolytique est l'acide lactique, ce qui permet de les classer en souches homofermentaires, produisant majoritairement de l'acide lactique, et en souches hétérofermentaires, produisant aussi de l'éthanol, de l'acide acétique et du CO_2 **(Axelsson, 2004 ; Zheng *et al.*, 2020).**

L'identification des BL est essentielle pour évaluer leurs propriétés technologiques et leur innocuité. Elle reposait historiquement sur des méthodes phénotypiques et biochimiques, telles que l'étude de la fermentation des glucides, du type fermentaire, de la production de gaz, de la mobilité et de la sporulation. Toutefois, ces approches restent parfois insuffisantes pour différencier des espèces ou des souches proches. Les méthodes moléculaires, notamment le séquençage du gène 16S rADN et le séquençage du génome entier, permettent aujourd'hui une caractérisation plus fiable des profils métaboliques, des fonctions bénéfiques et des applications potentielles des BL **(Zheng *et al.*, 2020 ; Jaffer *et al.*, 2023).**

II. Principales caractéristiques

II.1. Physiologie et morphologie

La classification des bactéries lactiques repose historiquement sur plusieurs critères phénotypiques, notamment la morphologie cellulaire, le mode de fermentation du glucose, la croissance à différentes températures et le type d'acide lactique produit. Ces critères, proposés notamment par Orla-Jensen, ont permis de définir les principaux genres classiques des bactéries lactiques, tels que *Lactobacillus, Leuconostoc, Pediococcus* et *Streptococcus*.

Cependant, les critères phénotypiques seuls restent limités pour établir des relations taxonomiques précises. Les approches moléculaires, en particulier le séquençage de l'ARNr 16S, ont permis une meilleure compréhension de la phylogénie des bactéries lactiques et ont contribué à la révision de leur classification.

Sur le plan physiologique, les bactéries lactiques sont surtout connues pour leur capacité à acidifier les milieux alimentaires par production d'acide lactique. Cette propriété explique leur rôle majeur dans les fermentations alimentaires et fourragères.

Malgré une apparente simplicité métabolique, elles présentent une diversité physiologique importante, leur permettant de s'adapter à différents environnements **(Stiles & Holzapfel, 1997 ; Khalid, 2011).**

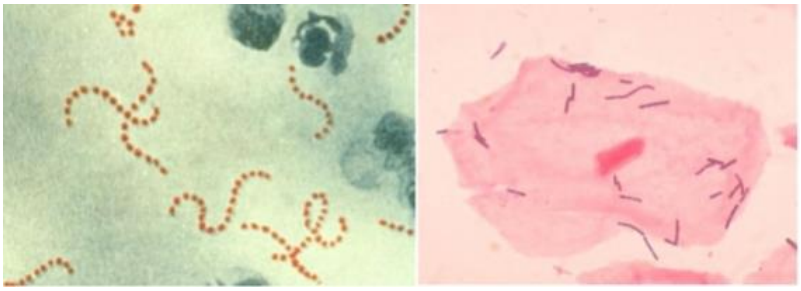


Figure 1. Bactéries sous forme de coques (*Streptococcus* pyogenes) et sous forme de bâtonnets (*Lactobacillus acidophilus*). Source **: Carré-Mlouka, 2018.**

II.2. Caractéristiques de l'environnement biochimique

La croissance et l'activité métabolique des bactéries lactiques dépendent d'un environnement biochimique et physicochimique adapté. Les principaux facteurs impliqués sont les glucides, les sources azotées, les vitamines, les minéraux, les lipides, les agents tampons, ainsi que la température, le pH, l'activité de l'eau et le potentiel d'oxydoréduction. Les glucides constituent la principale source de carbone et d'énergie, tandis que l'azote est fourni sous forme d'acides aminés, de peptides ou d'extraits complexes. Certains composés, comme les vitamines, les ions minéraux et les acides gras à faibles concentrations, peuvent stimuler la croissance. À l'inverse, un déséquilibre nutritionnel ou une concentration excessive de certains composants peut inhiber le développement bactérien. La composition du milieu doit donc être adaptée aux exigences de chaque souche afin d'optimiser sa croissance, son activité fermentaire et ses propriétés technologiques **(Hayek & Ibrahim, 2013).**

III. Classification taxonomique des bactéries lactiques

Les bactéries lactiques appartiennent principalement au phylum *Bacillota*, anciennement appelé *Firmicutes*, à la classe *Bacilli* et à l'ordre des *Lactobacillales*. Ce groupe comprend plusieurs familles, notamment *Lactobacillaceae*, *Leuconostocaceae*, *Streptococcaceae*, *Enterococcaceae*, *Carnobacteriaceae* et *Aerococcaceae*. Ces bactéries sont caractérisées par un métabolisme fermentaire conduisant à la production d'acide lactique comme principal produit de la dégradation des glucides. La taxonomie des bactéries lactiques a connu d'importantes révisions grâce aux approches moléculaires. En particulier, la révision du groupe des *Lactobacillaceae* a conduit à la réorganisation de nombreuses espèces auparavant classées

dans le genre *Lactobacillus*. Cette famille regroupe aujourd'hui plusieurs genres importants, tels que *Lactobacillus*, *Lactiplantibacillus*, *Lacticaseibacillus*, *Limosilactobacillus* et *Pediococcus* **(Zheng *et al.*, 2020).** Les méthodes moléculaires, notamment le séquençage du gène de l'ARNr 16S et le séquençage du génome entier, ont amélioré la précision de l'identification des bactéries lactiques. Cette évolution taxonomique est importante pour les applications agroalimentaires, car l'identification correcte des souches conditionne l'évaluation de leurs propriétés technologiques, probiotiques et de leur innocuité **(Avci *et al.*, 2025).**

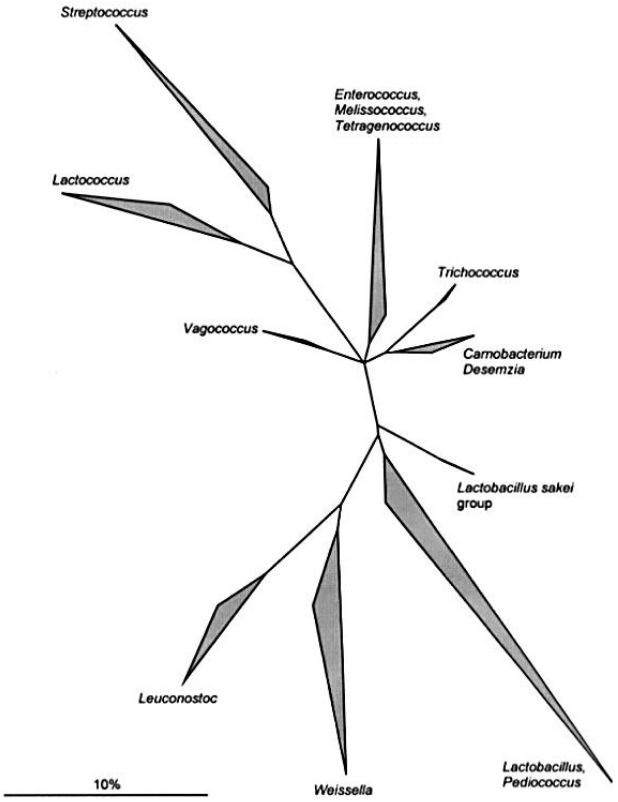


Figure 2. Arbre phylogénétique illustrant la position relative des genres de bactéries lactiques. Source **: Hammes & Hertel, 2006, cité dans Avci *et al.*, 2025.**

IV. Principaux genres des bactéries lactiques

IV.1. Le genre *Lactobacillus*

Les lactobacilles regroupent des bactéries lactiques de forme bacillaire, caractérisées par une grande diversité métabolique. Ils peuvent être classés selon leur mode fermentaire en homofermentaires obligatoires, hétérofermentaires facultatifs et hétérofermentaires obligatoires. Ces groupes diffèrent principalement par leur capacité à fermenter les hexoses et les pentoses, ainsi que par les produits finaux formés.

Certaines espèces anciennement rattachées à ce genre, comme *Lactobacillus plantarum*, actuellement nommée *Lactiplantibacillus plantarum*, présentent un intérêt industriel et probiotique. Elles sont fréquemment isolées de produits végétaux fermentés et peuvent produire des acides organiques et des substances antimicrobiennes, contribuant ainsi à la conservation des aliments fermentés **(Enan *et al.*, 2018).**

IV.2. Le genre Lactococcus

Les Lactococcus sont généralement associés aux plantes, au lait et aux produits alimentaires. Ils occupent une place importante dans les fermentations laitières, notamment grâce à leur capacité à acidifier rapidement le milieu par production d'acide lactique.

Cette propriété explique leur utilisation fréquente comme cultures starters dans la fabrication de plusieurs produits laitiers fermentés.

Bien que les Lactococcus soient généralement considérés comme peu pathogènes, certaines espèces, comme *Lactococcus garvieae*, ont été associées à de rares infections opportunistes. Leur identification peut parfois être difficile en raison de ressemblances phénotypiques avec certains streptocoques et entérocoques **(Aguirre & Collins, 1993 ; Cavanagh *et al.*, 2015).**

IV.3. Le genre Leuconostoc

Les Leuconostoc sont des bactéries lactiques de forme coccoïde ou lenticulaire, souvent disposées en paires ou en chaînes. Elles sont hétérofermentaires et produisent principalement de l'acide lactique, du CO_2 et d'autres composés aromatiques. Cette capacité leur confère un rôle important dans les fermentations alimentaires, notamment dans les produits laitiers, végétaux et carnés. Leur classification a été précisée par des approches moléculaires (Stiles & Holzapfel, 1997).

IV.4. Le genre *Streptococcus*

Le genre *Streptococcus* regroupe des bactéries de morphologie coccoïde, disposées en paires ou en chaînes. Elles fermentent les glucides en produisant principalement de l'acide lactique. Certaines espèces présentent un intérêt technologique, comme *Streptococcus thermophilus*, largement utilisé dans les produits laitiers fermentés. Cependant, le genre comprend aussi des espèces pathogènes, ce qui rend l'identification précise indispensable avant toute application alimentaire ou probiotique **(Enan *et al.*, 2018).**

IV.5. Le genre *Enterococcus*

Les *Enterococcus* regroupent des bactéries autrefois classées parmi les streptocoques fécaux. Les espèces les plus connues sont *Enterococcus faecalis* et *Enterococcus faecium*. Certaines souches peuvent intervenir dans les fermentations alimentaires, mais ce genre comprend également des espèces opportunistes pouvant poser des problèmes d'innocuité.

Leur utilisation dans le domaine alimentaire nécessite donc une identification fiable et une évaluation rigoureuse de leur sécurité

IV.6. Les genres *Pediococcus, Aerococcus, Tetragenococcus* et *Alloiococcus*

Les genres *Pediococcus*, *Aerococcus*, *Tetragenococcus* et *Alloiococcus* regroupent des bactéries à Gram positif, généralement non mobiles et anaérobies facultatives. Les *Pediococcus* sont surtout connus pour leur organisation en tétrades et leur rôle dans plusieurs fermentations alimentaires. *Tetragenococcus halophilus* est particulièrement associé aux milieux riches en sel.

La distinction entre ces genres nécessite souvent des critères moléculaires pour une identification fiable **(Enan *et al.*, 2018).**

IV.7. Le genre *Oenococcus*

Le genre *Oenococcus* regroupe des bactéries lactiques adaptées aux milieux acides et alcoolisés. L'espèce la plus connue est *Oenococcus oeni*, essentielle dans la fermentation malolactique du vin. D'autres espèces ont été décrites dans différents environnements liés aux boissons fermentées, notamment *O. alcoholitolerans*, *O. kitaharae* et *O. sicerae*. Ces espèces se distinguent par leur adaptation à des conditions de pH bas et à des concentrations variables en éthanol **(Balmaseda *et al.*, 2026).**

IV.8. Le genre *Bifidobacterium*

Le genre *Bifidobacterium* est souvent étudié avec les bactéries lactiques en raison de son intérêt probiotique et de sa capacité à produire des acides organiques. Cependant, il n'appartient pas strictement aux *Lactobacillales*. Les bifidobactéries sont des bactéries à Gram positif, anaérobies strictes, non sporulantes et immobiles, présentant une morphologie variable. Leur métabolisme est caractérisé par la voie du « bifid-shunt », conduisant principalement à la production d'acétate et de lactate. Leur présence est particulièrement importante dans le microbiote intestinal humain et animal **(O'Callaghan & Sinderen, 2016).**

V. Niche écologique et habitat des bactéries lactiques

Les BL sont largement répandues dans différents habitats naturels et alimentaires. Elles sont présentes dans les produits laitiers fermentés, les viandes, les légumes fermentés, ainsi que dans les tractus gastro-intestinal et urogénital de l'homme et des animaux. Certaines peuvent également être retrouvées dans les sols, les eaux et les végétaux. Le tube digestif constitue l'un des principaux réservoirs microbiens. Les bactéries lactiques, ainsi que d'autres genres associés comme *Bifidobacterium*, peuvent y contribuer à l'équilibre du microbiote intestinal. Leur adaptation à cet environnement dépend notamment de leur capacité à résister à l'acidité gastrique et aux sels biliaires, à utiliser les substrats disponibles et, dans certains cas, à adhérer au mucus intestinal. Dans l'intestin, le mucus joue un rôle protecteur en limitant l'adhésion des microorganismes pathogènes à l'épithélium. Certaines bactéries lactiques peuvent participer à cet effet barrière par compétition avec les pathogènes et par production de composés antimicrobiens, tels que les acides organiques et certaines substances inhibitrices **(Ayivi *et al.*, 2020).**

VI. Métabolisme des bactéries lactiques

VI.1. Métabolisme des glucides

Les bactéries lactiques utilisent les glucides comme principale source d'énergie et de carbone. Selon leur voie fermentaire, elles sont classées en bactéries homofermentaires ou hétérofermentaires. Les bactéries homofermentaires dégradent principalement le glucose par la voie glycolytique et produisent majoritairement de l'acide lactique, avec un rendement énergétique d'environ 2 ATP par mole de glucose. Chez les bactéries hétérofermentaires, le glucose est métabolisé par la voie des pentoses phosphates et de la phosphokétolase. Cette fermentation conduit à la production d'acide lactique, mais aussi de CO_2, d'éthanol et/ou d'acide acétique. La nature des produits formés dépend notamment de l'espèce bactérienne, des conditions du milieu et de la disponibilité des substrats. **(Axelsson, 2004 ; Bintsis, 2018).**

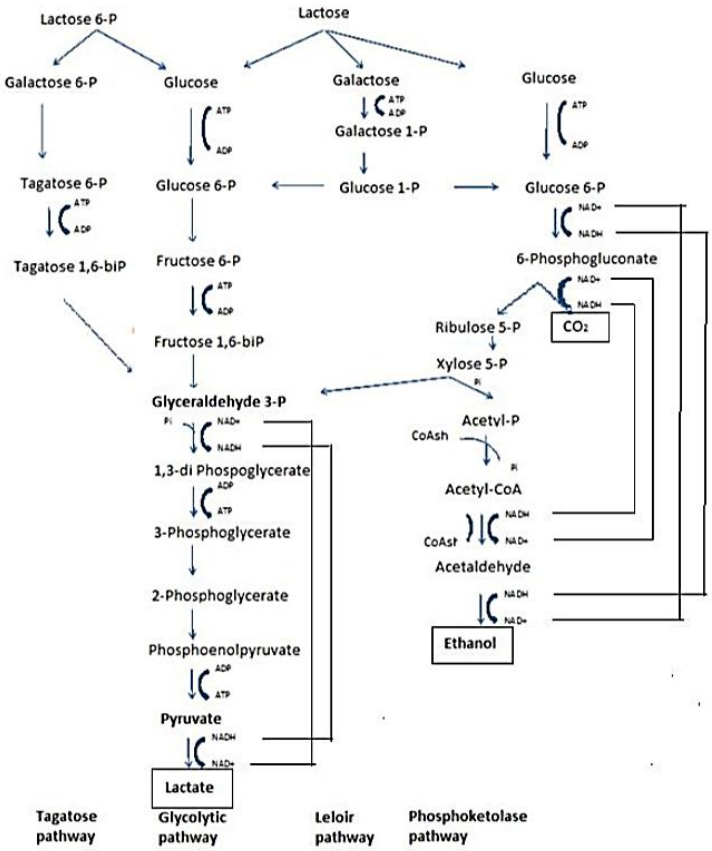


Figure 3. Voies du métabolisme du lactose chez les bactéries lactiques. Source : **Bintsis, 2018.**

VI.2. Métabolisme protéique

Les bactéries lactiques sont généralement exigeantes en nutriments et ne synthétisent pas toujours tous les acides aminés nécessaires à leur croissance. Dans le lait, les acides aminés libres sont peu abondants ; leur développement dépend donc en partie de l'hydrolyse des protéines laitières en peptides, puis en acides aminés assimilables. Cette activité protéolytique joue un rôle important dans la croissance bactérienne, mais aussi dans le développement de la texture et de l'arôme des produits fermentés, notamment les fromages **(Kunji *et al.*, 1996** ; **Bintsis, 2018).**

VI.3. Métabolisme des lipides

Chez les bactéries lactiques, le métabolisme des lipides est généralement moins intense que le métabolisme des glucides et des protéines. Toutefois, certaines souches peuvent présenter des activités lipasiques ou estérasiques capables de participer à l'hydrolyse partielle des lipides du lait. Cette hydrolyse conduit à la libération d'acides gras libres, qui jouent un rôle important dans le développement de l'arôme des fromages. Ces composés peuvent agir directement sur le

profil sensoriel du produit ou servir de précurseurs à d'autres molécules volatiles, telles que les esters, les lactones, les alcools et les composés carbonylés.

Dans les fromages, la lipolyse dépend de plusieurs facteurs, notamment la composition du lait, les enzymes naturellement présentes, les microorganismes impliqués dans la fermentation et les conditions d'affinage. Bien que les bactéries lactiques soient généralement considérées comme faiblement lipolytiques, leur contribution peut devenir significative dans certaines matrices fromagères, surtout lorsque les cellules bactériennes libèrent leurs enzymes au cours de la fermentation ou de l'affinage. Cette activité est particulièrement intéressante dans les fromages à base de lait caprin, où les acides gras libres participent fortement aux caractéristiques aromatiques spécifiques du produit **(Collins *et al.*, 2003).**

VI.4. Métabolisme des acides organiques : citrate et malate

Le métabolisme du citrate est particulièrement important dans les produits laitiers fermentés, tandis que celui du malate intervient surtout dans la fermentation malolactique du vin. Certaines bactéries lactiques, notamment *Leuconostoc* spp. et des souches de *Lactococcus lactis* capables d'utiliser le citrate, transforment ce composé en pyruvate. Celui-ci peut ensuite conduire à la formation de composés aromatiques tels que le diacétyle, l'acétoïne et le 2,3-butanediol. Le métabolisme du citrate peut également produire du CO_2, impliqué dans la formation d'ouvertures dans certains fromages **(Bintsis, 2018).**

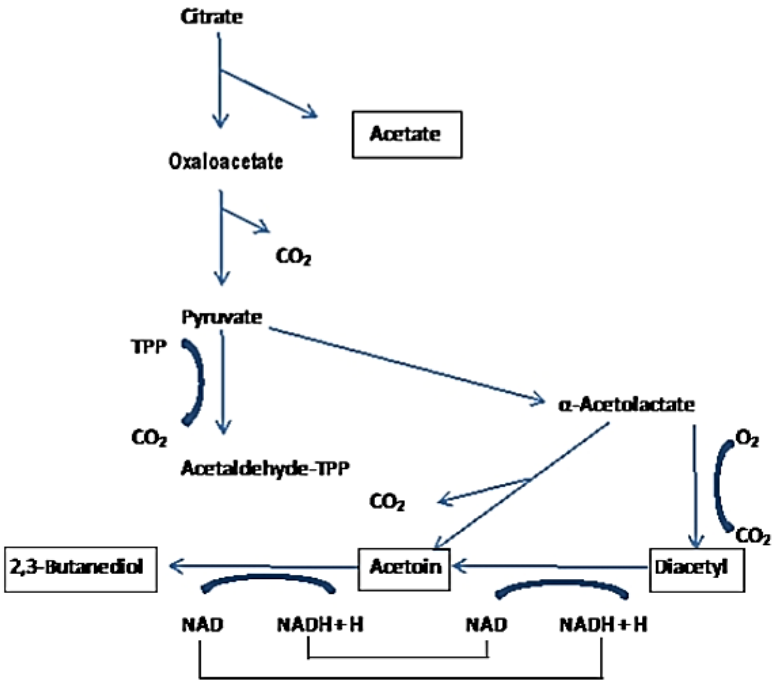


Figure 4. Métabolisme du citrate chez les bactéries lactiques. Source : **Bintsis, 2018.**

VII. Types de fermentation chez les bactéries lactiques

Les bactéries lactiques produisent principalement de l'acide lactique à partir des glucides, ce qui entraîne une diminution du pH du milieu. Selon les voies métaboliques utilisées et les produits formés, on distingue principalement deux types de fermentation lactique : la fermentation homolactique et la fermentation hétérolactique.

VII.1. Fermentation homolactique

La fermentation homolactique repose sur la glycolyse, ou voie d'Embden-Meyerhof. Elle conduit à la transformation du glucose en pyruvate, puis en lactate. Cette voie produit principalement de l'acide lactique, avec un rendement énergétique d'environ 2 ATP par molécule de glucose. Elle est caractéristique de plusieurs bactéries lactiques homofermentaires, notamment certains représentants des genres *Lactococcus*, *Streptococcus* et *Lactobacillus*.

VII.2. Fermentation hétérolactique

La fermentation hétérolactique implique principalement la voie des pentoses phosphates et de la phosphokétolase. Elle aboutit à la production d'acide lactique, mais aussi de CO_2, d'éthanol et/ou d'acide acétique selon les espèces et les conditions du milieu. Cette voie fournit généralement un rendement énergétique plus faible que la fermentation homolactique. Elle est observée notamment chez certains *Leuconostoc* et lactobacilles hétérofermentaires. D'autres métabolismes, comme celui du citrate, peuvent également contribuer à la formation de composés aromatiques dans les aliments fermentés **(Axelsson, 2004; Carré-Mlouka, 2018).**

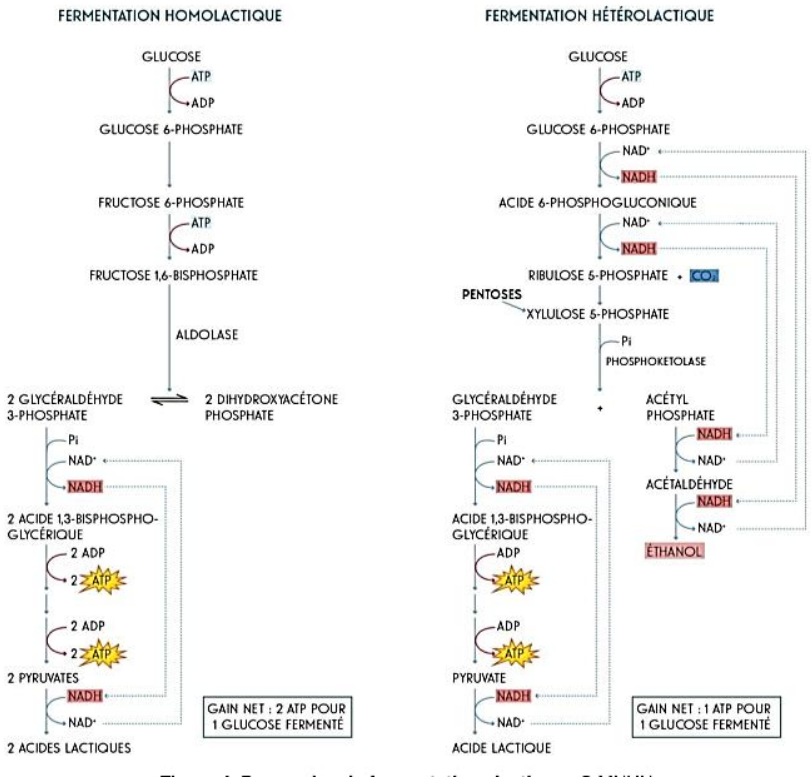


Figure 5. Voies de fermentation homolactique et hétérolactique. Source **: Carré-Mlouka, 2018.**

VIII. Facteurs influençant la croissance, la survie et la viabilité des bactéries lactiques

La croissance, la survie et l'activité métabolique des bactéries lactiques dépendent fortement des conditions du milieu, notamment la température, le pH, la disponibilité en oxygène, l'activité de l'eau, le stress osmotique et la présence d'additifs. Ces facteurs peuvent favoriser ou limiter leur développement selon l'espèce, la souche et la matrice alimentaire. Les conditions défavorables peuvent altérer la membrane cellulaire, les protéines ou l'ADN, tandis que certaines bactéries lactiques développent des mécanismes d'adaptation, comme la production de protéines de stress, la régulation du pH intracellulaire et la modification de la composition membranaire. Ainsi, le contrôle de ces paramètres est essentiel pour maintenir la viabilité et les performances technologiques des bactéries lactiques dans les produits fermentés **(Sionek *et al.*, 2024).**

IX. Méthodes d'identification des bactéries lactiques

L'identification des bactéries lactiques repose d'abord sur des méthodes classiques, incluant l'observation morphologique, la coloration de Gram, le test de catalase et la culture sur

milieux sélectifs ou enrichis, comme le milieu MRS. Ces méthodes permettent une première orientation, mais elles restent insuffisantes pour identifier précisément les espèces ou différencier des souches proches. Dans certains secteurs, comme la brasserie, des milieux spécifiques ont été développés pour détecter les bactéries lactiques d'altération, mais leur efficacité dépend fortement de la matrice et des espèces recherchées **(Matoulková & Kubizniaková, 2015).**

Les méthodes moléculaires ont amélioré la fiabilité de l'identification des bactéries lactiques. Le séquençage du gène de l'ARNr 16S est largement utilisé pour l'identification au niveau du genre ou de l'espèce. D'autres techniques, comme le ribotypage, l'ARDRA, le RAPD, l'AFLP, la PFGE, la Rep-PCR, la DGGE/TGGE, la T-RFLP, le MLST et la PCR en temps réel, permettent une caractérisation plus fine selon l'objectif recherché. Cependant, aucune méthode unique ne permet à elle seule une identification complète et définitive des isolats.

Les approches récentes, telles que les puces à ADN, la spectrométrie de masse MALDI-TOF et le séquençage du génome entier, offrent une meilleure résolution pour l'identification et la caractérisation des souches. Toutefois, leur coût et les besoins techniques ou bioinformatiques peuvent limiter leur utilisation courante. Ainsi, une approche polyphasique, associant des méthodes phénotypiques et moléculaires, reste la stratégie la plus fiable pour l'identification des bactéries lactiques **(Sharma *et al.*, 2020).**

X. Composés antimicrobiens des bactéries lactiques

Les bactéries lactiques peuvent produire plusieurs substances antimicrobiennes capables d'inhiber la croissance de microorganismes indésirables ou pathogènes. Ces composés comprennent principalement les acides organiques, notamment l'acide lactique, le peroxyde d'hydrogène, le diacétyle, la réutérine et les bactériocines. Leur production dépend de l'espèce, de la souche, de la composition du milieu et des conditions de culture. L'activité antimicrobienne peut être évaluée par différentes méthodes, notamment les tests de diffusion sur gélose et les méthodes de dilution en milieu liquide ou solide **(Şanlıbaba & Güçer, 2015).**

X.1. Acide lactique

L'acide lactique constitue l'un des principaux composés responsables de l'effet antimicrobien des bactéries lactiques. Sa production entraîne une diminution du pH du milieu, ce qui limite le développement de nombreux microorganismes sensibles. À pH acide, une partie de l'acide lactique se trouve sous forme non dissociée ; cette forme peut traverser la membrane

cellulaire des microorganismes cibles, perturber le pH intracellulaire et affecter certaines fonctions métaboliques. L'intensité de cet effet varie selon la souche productrice, le microorganisme cible et les conditions du milieu **(Ibrahim *et al.*, 2021).**

X.2. Diacétyle

Le diacétyle est un composé issu du métabolisme du pyruvate et du citrate. Il est surtout connu pour son rôle dans l'arôme caractéristique de certains produits laitiers fermentés, notamment le beurre, le babeurre et certains fromages. Il peut être produit par des souches de *Lactococcus lactis subsp. lactis biovar diacetylactis*, ainsi que par certains *Leuconostoc* et *Weissella*. En plus de son intérêt aromatique, le diacétyle peut contribuer à l'activité antimicrobienne des bactéries lactiques contre certains microorganismes sensibles **(Şanlıbaba & Güçer, 2015).**

X.3. Peroxyde d'hydrogène

Certaines bactéries lactiques peuvent produire du peroxyde d'hydrogène en présence d'oxygène. Ce composé possède une activité antimicrobienne liée à son pouvoir oxydant. Il peut altérer les protéines, les enzymes et les lipides membranaires des microorganismes sensibles. Toutefois, sa production varie fortement selon les espèces, les souches et les conditions d'aération.

X.4. Réutérine

La réutérine est un composé antimicrobien produit principalement par certaines souches de *Limosilactobacillus reuteri*, anciennement *Lactobacillus reuteri*, lors du métabolisme du glycérol. Elle possède un spectre d'action relativement large, pouvant concerner des bactéries Gram positives, Gram négatives, des levures et des moisissures. Son potentiel d'application en bioconservation dépend de la disponibilité du glycérol et des conditions de croissance de la souche productrice **(Şanlıbaba & Güçer, 2015, Ibrahim *et al.*, 2021).**

X.5. Bactériocines

Les bactériocines sont des peptides ou protéines antimicrobiens produits par certaines bactéries lactiques. Elles sont synthétisées par voie ribosomique et peuvent inhiber des bactéries proches ou d'autres bactéries sensibles. Leur spectre d'action est généralement plus marqué contre les bactéries Gram positives, bien que certaines conditions puissent augmenter la sensibilité des bactéries Gram négatives. Les souches productrices possèdent généralement des mécanismes d'immunité leur permettant de résister à leur propre bactériocine. Les bactériocines

présentent un intérêt particulier en bioconservation alimentaire. La nisine, produite par *Lactococcus lactis*, est l'exemple le plus connu et est utilisée comme conservateur alimentaire dans plusieurs produits. D'autres bactériocines, comme la pédiocine produite par certaines souches de *Pediococcus*, sont également étudiées pour leur activité contre des bactéries indésirables, notamment dans les aliments fermentés **(Şanlıbaba & Güçer, 2015, Ibrahim *et al.*, 2021).**

XI. Intérêts et applications des bactéries lactiques

Les bactéries lactiques occupent une place importante dans plusieurs domaines, en particulier dans l'industrie alimentaire. Leur intérêt repose principalement sur leur capacité à fermenter les glucides, à produire de l'acide lactique, à améliorer les qualités organoleptiques des aliments et à contribuer à leur conservation. Elles sont utilisées dans de nombreux produits fermentés, notamment les yaourts, les fromages, les légumes fermentés, les produits carnés, les céréales fermentées et certaines boissons.

XI.1. Applications dans l'industrie alimentaire

Dans l'industrie alimentaire, les bactéries lactiques sont principalement utilisées comme cultures starters. Leur rôle est d'assurer une fermentation contrôlée, reproductible et sécurisée. Elles permettent l'acidification du milieu par production d'acide lactique, ce qui contribue à limiter le développement de certains microorganismes indésirables. Elles participent également au développement de la texture, du goût et de l'arôme des produits fermentés.

Dans les produits laitiers, les bactéries lactiques interviennent dans la fabrication des yaourts, fromages et laits fermentés. Elles contribuent à la coagulation acide, à l'affinage, à la formation des arômes et à l'amélioration de la qualité sensorielle. Dans les produits végétaux fermentés, elles assurent l'acidification et participent à la stabilisation du produit. Dans les produits céréaliers et carnés, certaines souches peuvent également améliorer les caractéristiques technologiques et sensorielles des aliments **(Masood *et al.*, 2011 ; Adamu *et al.*, 2025).**

XI.2. Biopréservation et sécurité alimentaire

Les bactéries lactiques présentent aussi un intérêt en biopréservation. Cette propriété est liée à leur capacité à produire plusieurs composés antimicrobiens, tels que les acides organiques, le peroxyde d'hydrogène, le diacétyle et certaines bactériocines. Ces substances peuvent inhiber des microorganismes d'altération ou des pathogènes alimentaires, contribuant ainsi à prolonger la durée de conservation des aliments. Les bactériocines produites par

certaines souches de bactéries lactiques sont particulièrement étudiées pour leur potentiel d'application dans la conservation naturelle des aliments. La nisine, par exemple, est l'une des bactériocines les plus connues dans le domaine alimentaire. Toutefois, l'efficacité de la biopréservation dépend fortement de la souche utilisée, de la matrice alimentaire, du pH, de la température et des conditions de stockage. Toute application nécessite donc une sélection rigoureuse des souches et une validation expérimentale dans le produit concerné **(Adamu *et al.*, 2025).**

XI.3. Intérêt probiotique et nutritionnel

Certaines bactéries lactiques sont étudiées pour leur potentiel probiotique. Un probiotique doit être vivant, administré en quantité suffisante et apporter un bénéfice démontré à l'hôte. Les effets recherchés peuvent inclure la contribution à l'équilibre du microbiote intestinal, l'amélioration de la tolérance au lactose, la modulation de certaines réponses immunitaires et l'inhibition de microorganismes indésirables. Cependant, ces effets ne peuvent pas être généralisés à toutes les bactéries lactiques, car ils sont spécifiques à la souche.

Sur le plan nutritionnel, certaines souches peuvent contribuer à l'amélioration de la valeur nutritive des aliments fermentés. Elles peuvent participer à la production de vitamines, à la dégradation de certains facteurs antinutritionnels ou à l'amélioration de la digestibilité de certains constituants alimentaires. Ces propriétés renforcent l'intérêt des bactéries lactiques dans le développement d'aliments fonctionnels, à condition que leur efficacité et leur sécurité soient bien établies **(Masood *et al.*, 2011 ; Avci *et al.*, 2025).**

XI.4. Applications biotechnologiques, agricoles et thérapeutiques

Au-delà du domaine alimentaire, les bactéries lactiques présentent des applications dans d'autres secteurs. En agriculture, certaines souches peuvent être utilisées dans l'ensilage, la conservation des fourrages ou comme agents de biocontrôle. Leur capacité à produire des acides organiques et des substances antimicrobiennes peut contribuer à limiter certains microorganismes indésirables dans les matrices agricoles.

Dans le domaine biotechnologique et thérapeutique, certaines bactéries lactiques, notamment *Lactococcus lactis* et des lactobacilles, sont étudiées comme vecteurs de molécules d'intérêt. Elles peuvent être utilisées expérimentalement pour la délivrance de protéines ou de composés actifs au niveau des muqueuses. Toutefois, ces applications restent spécialisées et nécessitent des validations rigoureuses avant toute utilisation clinique ou industrielle. De plus, certains genres comme *Enterococcus* doivent être considérés avec prudence, car leur utilisation

alimentaire dépend fortement de l'identification précise de la souche et de l'évaluation de son innocuité **(Kilic, 2024 ; Adamu *et al.*, 2025).**



Figure 6. Principales applications industrielles de l'acide lactique. Source : **Ahmad *et al.*, cité dans Adamu *et al.*, 2025.**

XII. Bactéries lactiques associées aux végétaux fermentés

La fermentation lactique des végétaux constitue un procédé traditionnel de conservation permettant d'améliorer la stabilité, la qualité microbiologique, la valeur nutritionnelle et les caractéristiques sensorielles des produits. Elle est particulièrement importante pour les légumes et les fruits périssables, car l'acidification du milieu limite le développement de nombreux microorganismes indésirables et contribue à prolonger la durée de conservation des aliments **(Di Cagno *et al.*, 2013 ; Swain *et al.*, 2014).**

Les végétaux crus ou spontanément fermentés constituent également des réservoirs importants de bactéries lactiques. Plusieurs genres y ont été rapportés, notamment *Lactiplantibacillus*, *Limosilactobacillus*, *Levilactobacillus*, *Pediococcus*, *Leuconostoc*, *Weissella*, *Lactococcus* et certaines espèces d'*Enterococcus*. Parmi les espèces fréquemment associées aux matrices végétales fermentées figurent notamment *Lactiplantibacillus plantarum*, anciennement *Lactobacillus plantarum*, *Limosilactobacillus fermentum*, *Levilactobacillus brevis*, *Pediococcus pentosaceus* et *Leuconostoc mesenteroides*. Ces bactéries ont été décrites dans diverses matrices végétales, telles que les choux, les concombres, les carottes, les betteraves rouges, les tomates, les aubergines, les câpres et certains fruits fermentés **(Di Cagno *et al.*, 2013; Swain *et al.*, 2014).**

Des produits végétaux fermentés traditionnels, tels que le gundruk, le sinki, l'inziangsang, le kanji et les pousses de bambou fermentées, ont également été décrits comme des niches riches en bactéries lactiques. Certaines souches isolées de ces matrices présentent des propriétés technologiques intéressantes, notamment une capacité d'acidification, une activité antimicrobienne, une production enzymatique et une adaptation aux substrats végétaux. Toutefois, leur utilisation comme cultures starters ou comme probiotiques nécessite une identification fiable, ainsi qu'une évaluation de leur innocuité et de leurs propriétés fonctionnelles **(Tamang *et al.*, 2009 ; Sarwar *et al.*, 2018).**

Chapitre II : Les Produits Fermentés

I. Définition et généralités

Les produits fermentés sont des aliments ou des boissons obtenus grâce à une croissance microbienne souhaitée et à des conversions enzymatiques des constituants alimentaires. Cette définition permet de distinguer la fermentation alimentaire d'une simple altération microbienne : dans la fermentation, l'activité des microorganismes est recherchée afin d'obtenir un produit stable, acceptable et doté de caractéristiques spécifiques **(Dimidi *et al.*, 2019 ; Marco *et al.*, 2021).** La fermentation concerne une grande diversité de matières premières, notamment les produits laitiers, les légumes, les fruits, les céréales, les légumineuses, les viandes, les poissons et certaines boissons. Elle peut être spontanée, lorsque la microflore naturellement présente dans la matière première ou l'environnement assure le processus, ou dirigée, lorsqu'une culture starter sélectionnée est ajoutée afin d'obtenir une fermentation plus contrôlée et reproductible. Une pratique intermédiaire, appelée réensemencement ou back-slopping, consiste à utiliser une partie d'un produit fermenté précédent pour initier une nouvelle fermentation **(Dimidi *et al.*, 2019 ; Sionek *et al.*, 2023).**

Historiquement, la fermentation a surtout été utilisée comme méthode de conservation. L'acidification du milieu, la production d'éthanol, de composés antimicrobiens ou d'autres métabolites limitent le développement de nombreux microorganismes indésirables. Aujourd'hui, elle est également étudiée pour son intérêt sensoriel, nutritionnel et technologique, car elle peut améliorer les arômes, la texture, la digestibilité et parfois la biodisponibilité de certains nutriments **(Siddiqui *et al.*, 2023 ; Marco *et al.*, 2021).**

II. Concept et importance de la fermentation

Au sens microbiologique appliqué aux aliments, la fermentation correspond à la transformation contrôlée d'un substrat par des microorganismes, principalement des bactéries, des levures ou des moisissures. Ces microorganismes utilisent les constituants disponibles, notamment les glucides, les protéines ou certains acides organiques, et produisent des métabolites tels que les acides organiques, l'éthanol, le dioxyde de carbone, les composés aromatiques ou des substances antimicrobiennes. Il est important de noter que toutes les fermentations alimentaires ne sont pas strictement anaérobies : la fermentation acétique, par exemple, dépend de bactéries acétiques aérobies **(Marco *et al.*, 2021).**

II.1. Intérêt technologique

Sur le plan technologique, la fermentation permet de transformer des matières premières périssables en produits plus stables et mieux acceptés par le consommateur. Les

microorganismes impliqués modifient le pH, la structure, la texture et le profil aromatique des aliments. Dans les procédés modernes, la maîtrise des cultures starters, du pH, de la température, de la salinité, de l'activité de l'eau et de la durée de fermentation permet d'améliorer la sécurité, la qualité et la reproductibilité du produit final. Les approches récentes, comme les analyses omiques et la sélection raisonnée des souches, renforcent également la compréhension des interactions microbiennes et des métabolites produits **(Siddiqui *et al.*, 2023 ; Singh & Kumar, 2025).**

II.2. Intérêt nutritionnel

La fermentation peut améliorer la valeur nutritionnelle des aliments par plusieurs mécanismes. Elle favorise l'hydrolyse partielle de macromolécules, telles que les protéines ou les polysaccharides, en composés plus facilement assimilables. Elle peut aussi réduire certains facteurs antinutritionnels, comme les phytates dans les matrices céréalières ou légumineuses, et augmenter la disponibilité de certains minéraux. Certaines fermentations sont également associées à la production de vitamines, de peptides bioactifs ou d'autres composés d'intérêt. Toutefois, ces effets dépendent fortement de la matrice alimentaire, des souches impliquées et des conditions du procédé ; ils ne doivent donc pas être généralisés à tous les produits fermentés **(Marco *et al.*, 2021; Ogrodowczyk & Drabińska, 2021).**

III. Principaux types de fermentation

III.1. Fermentation lactique

La fermentation lactique est principalement réalisée par les bactéries lactiques. Elle repose sur la transformation des glucides en acide lactique, accompagnée ou non de la production de CO_2, d'éthanol ou d'acide acétique selon les espèces et les voies métaboliques. Cette acidification contribue à la conservation du produit et au développement de caractéristiques sensorielles spécifiques. La fermentation lactique est largement impliquée dans la fabrication de nombreux produits laitiers, végétaux, céréaliers et carnés fermentés **(Sionek *et al.*, 2023).**

III.2. Fermentation alcoolique

La fermentation alcoolique est principalement assurée par les levures, en particulier Saccharomyces cerevisiae. Elle transforme les sucres fermentescibles en éthanol et en CO_2. Elle joue un rôle central dans la production du pain, du vin, de la bière et de nombreuses boissons fermentées. Dans certains procédés, des levures non-Saccharomyces peuvent aussi intervenir

et contribuer à la complexité aromatique du produit final **(Siddiqui *et al.*, 2023 ; Singh & Kumar, 2025).**

III.3. Fermentation acétique

La fermentation acétique est réalisée par des bactéries acétiques, généralement Gram négatif et aérobies strictes. Ces bactéries oxydent l'éthanol en acide acétique, ce qui constitue la base de la production du vinaigre. Elles peuvent également intervenir dans d'autres écosystèmes fermentés, comme le kombucha, certaines bières acides ou des fermentations de cacao et de café. Leur activité dépend fortement de la disponibilité en oxygène et de leur tolérance à l'acidité **(Qiu et *al.*, 2021 ; Román-Camacho *et al.*, 2023).**

III.4. Fermentation propionique

La fermentation propionique est surtout connue dans les fromages à pâte pressée cuite de type suisse. Des bactéries propioniques, notamment *Propionibacterium freudenreichii*, utilisent le lactate produit par les bactéries lactiques et le transforment en propionate, acétate et CO_2. Ces métabolites participent au goût caractéristique et à la formation des ouvertures, ou « yeux », dans certains fromages **(Dalmasso *et al.*, 2012).**

III.5. Fermentation malolactique

La fermentation malolactique correspond à la conversion de l'acide malique en acide lactique et CO_2 par certaines bactéries lactiques, principalement *Oenococcus oeni* dans le vin. Elle intervient généralement après la fermentation alcoolique et contribue à réduire l'acidité, à améliorer la stabilité microbiologique et à modifier le profil sensoriel de certains vins **(Fu *et al.*, 2022).**

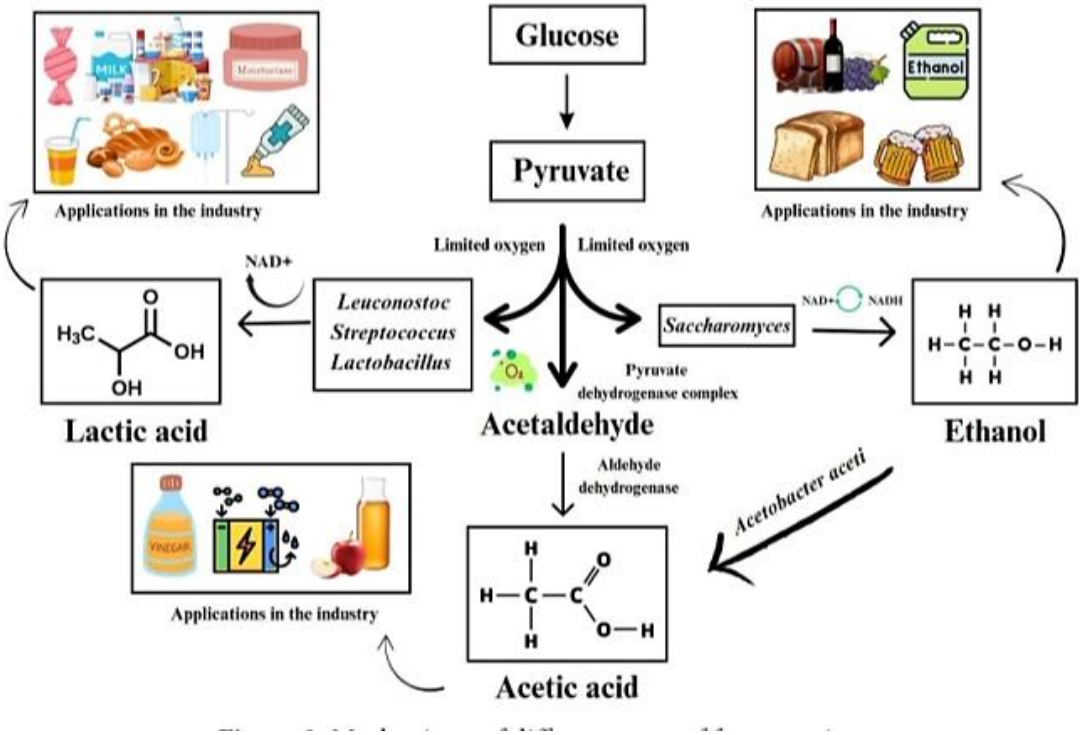


Figure 7. Principaux mécanismes associés aux fermentations lactique, alcoolique et acétique. Source : **Singh & Kumar, 2025**.

IV. Micro-organismes impliqués dans les aliments fermentés

IV.1. Bactéries

Les bactéries constituent un groupe majeur dans les écosystèmes des aliments fermentés. Les bactéries lactiques y occupent une place centrale, en particulier dans les produits acides, grâce à leur capacité à produire de l'acide lactique et d'autres composés contribuant à la conservation et aux qualités sensorielles. D'autres groupes, comme les bactéries acétiques, les *Bacillus* ou les bactéries propioniques, interviennent selon la nature du produit et les conditions du procédé **(Sionek *et al.*, 2023 ; Singh & Kumar, 2025).**

IV.2. Levures

Les levures interviennent dans de nombreuses fermentations, notamment la panification, les boissons alcoolisées, le kéfir, le levain et certains produits végétaux ou laitiers fermentés. Elles contribuent à la production d'éthanol, de CO_2, d'esters, d'alcools supérieurs et d'autres composés aromatiques. Dans certains écosystèmes, elles interagissent avec les bactéries lactiques en modifiant la disponibilité des nutriments, le pH ou les composés aromatiques **(Siddiqui *et al.*, 2023 ; Singh & Kumar, 2025).**

IV.3. Moisissures

Les moisissures peuvent être indésirables lorsqu'elles signalent une altération, mais certaines espèces sont volontairement utilisées dans des fermentations alimentaires. Elles interviennent notamment dans les fromages affinés, les produits à base de soja et certains starters asiatiques. Leur rôle repose sur la production d'enzymes capables de dégrader les protéines, les lipides ou les polysaccharides, contribuant ainsi à la texture et aux arômes. Leur utilisation exige cependant une sélection rigoureuse de souches sûres, notamment en raison du risque potentiel de mycotoxines chez certaines espèces **(Siddiqui *et al.*, 2023).**

IV.4. Interactions microbiennes

Les aliments fermentés sont souvent des écosystèmes complexes où plusieurs espèces microbiennes coexistent. Les interactions peuvent être positives, par exemple lorsqu'une espèce libère des nutriments utilisables par une autre, ou compétitives, lorsqu'il existe une rivalité pour les substrats ou la production de composés antimicrobiens. Chez les bactéries lactiques, l'acidification rapide, la compétition nutritionnelle et la production de bactériocines ou d'acides organiques peuvent limiter le développement de microorganismes indésirables **(Ibrahim *et al.*, 2021 ; Marco *et al.*, 2021).**

V. Succession microbienne au cours de la fermentation

V.1. Flore initiale

La flore initiale correspond à l'ensemble des microorganismes naturellement présents dans les matières premières, les ustensiles, l'eau, l'air ou l'environnement de fabrication. Cette flore varie fortement selon la matrice alimentaire, la qualité hygiénique de la matière première, la saison et les pratiques artisanales ou industrielles. Elle peut contenir des microorganismes utiles à la fermentation, mais aussi des microorganismes d'altération ou des contaminants potentiellement indésirables **(Marco *et al.*, 2021; Sionek *et al.*, 2023).**

V.2. Microflore dominante pendant la fermentation

Au cours de la fermentation, les conditions du milieu évoluent progressivement. La diminution du pH, la consommation des nutriments, la production de sel, d'alcool, de CO_2 ou d'acides organiques exercent une pression de sélection sur la communauté microbienne. Dans de nombreux produits végétaux et laitiers fermentés, les bactéries lactiques deviennent dominantes lorsque l'acidification progresse. Dans d'autres matrices, les levures, les moisissures, les bactéries acétiques ou les *Bacillus* peuvent également occuper une place

importante selon le substrat et les conditions de fermentation **(Marco *et al.*, 2021 ; Sionek *et al.*, 2023).**

V.3. Rôle dans la transformation alimentaire

La succession microbienne influence directement la qualité finale des aliments fermentés. Les microorganismes peuvent améliorer les propriétés organoleptiques par la formation d'acides, d'alcools, d'esters, de composés carbonylés et de peptides aromatiques. Ils peuvent aussi améliorer la digestibilité par l'hydrolyse partielle des protéines, des glucides complexes ou de certains facteurs antinutritionnels. Toutefois, les effets bénéfiques restent dépendants des espèces et des souches impliquées, ce qui justifie l'intérêt des cultures starters sélectionnées et du contrôle du procédé **(Marco *et al.*, 2021 ; Singh & Kumar, 2025).**

VI. Facteurs influençant la fermentation

VI.1. Nature du substrat

La composition du substrat conditionne fortement le déroulement de la fermentation. La disponibilité des sucres fermentescibles, des protéines, des acides aminés, des minéraux et des facteurs de croissance influence la croissance microbienne et les métabolites produits. Les matrices riches en glucides favorisent souvent les fermentations lactiques ou alcooliques, tandis que les matrices riches en protéines ou en lipides peuvent conduire à des profils aromatiques plus complexes lors de l'affinage ou de la maturation **(Siddiqui *et al.*, 2023).**

VI.2. Température

La température agit directement sur la croissance des microorganismes et sur l'activité enzymatique. Une température trop basse ralentit la fermentation, alors qu'une température trop élevée peut inhiber certaines souches ou favoriser des microorganismes non désirés. Le choix de la température doit donc être adapté à la flore recherchée, à la matrice alimentaire et au produit final attendu.

VI.3. pH

Le pH est l'un des paramètres les plus importants dans la fermentation. Sa diminution, notamment par production d'acide lactique ou acétique, participe à la conservation du produit et à l'inhibition de nombreux microorganismes sensibles. Toutefois, une acidification excessive ou trop rapide peut aussi modifier négativement les qualités sensorielles ou inhiber certaines activités enzymatiques utiles au procédé. Le contrôle du pH est donc essentiel pour concilier sécurité, stabilité et qualité.

VI.4. Oxygène

La disponibilité en oxygène influence fortement la nature de la fermentation. Les levures et les bactéries lactiques peuvent fonctionner dans des conditions pauvres en oxygène, alors que les bactéries acétiques nécessitent l'oxygène pour oxyder l'éthanol en acide acétique. À l'inverse, une exposition excessive à l'oxygène peut favoriser l'oxydation, l'altération de la couleur, la perte d'arômes et le développement de microorganismes aérobies indésirables.

VI.5. Inoculum et cultures starters

La qualité et la quantité d'inoculum déterminent la vitesse de démarrage de la fermentation. Dans les fermentations spontanées, la flore initiale conduit le processus de manière moins prévisible. Les cultures starters permettent au contraire d'orienter rapidement la fermentation vers les espèces souhaitées, d'améliorer la reproductibilité et de limiter les déviations microbiologiques. Le choix d'un starter doit tenir compte de ses capacités d'acidification, de sa tolérance au milieu, de ses effets sensoriels et de son innocuité **(Sionek *et al.*, 2023 ; Siddiqui *et al.*, 2023).**

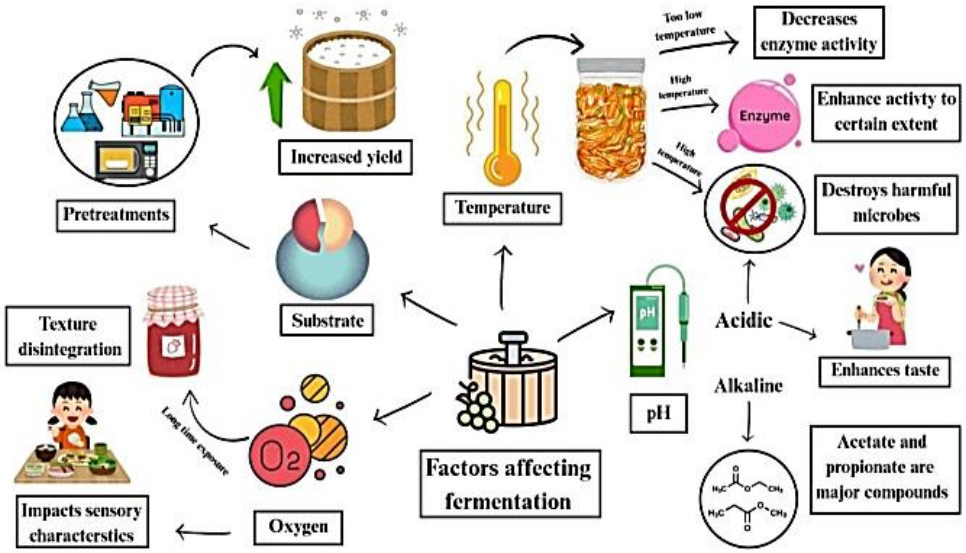


Figure 8. Principaux facteurs influençant le processus fermentaire et les caractéristiques des produits obtenus. Source : **Singh & Kumar, 2025**.

VII. Principales catégories de produits fermentés traditionnels

Les aliments fermentés traditionnels peuvent être classés selon leur matière première principale. Cette classification reste indicative, car de nombreux produits résultent d'écosystèmes microbiens mixtes et de procédés locaux très différents.

VII.1. Produits laitiers fermentés

Les produits laitiers fermentés comprennent les yaourts, laits fermentés, kéfirs, fromages frais et fromages affinés. Ils reposent principalement sur l'action des bactéries lactiques, parfois associées à des levures, des moisissures ou des bactéries d'affinage. Ces microorganismes participent à l'acidification, à la coagulation, à la texture et au développement des arômes.

VII.2. Produits végétaux fermentés

Les légumes et fruits fermentés comprennent notamment les choux fermentés, les concombres fermentés, les olives, le kimchi et plusieurs produits végétaux traditionnels. Les bactéries lactiques y jouent souvent un rôle dominant par l'acidification rapide du milieu. Ces matrices constituent des sources intéressantes pour l'isolement de souches adaptées aux substrats végétaux et potentiellement utiles en bioconservation ou comme cultures starters.

VII.3. Produits céréaliers et amylacés fermentés

Les céréales et les produits amylacés fermentés incluent les pains au levain, les bouillies fermentées, l'injera, l'ogi, le kenkey et certains produits à base de manioc. Les fermentations y sont souvent mixtes, impliquant bactéries lactiques, levures et parfois moisissures. Elles peuvent améliorer l'acidité, la texture, la digestibilité et la disponibilité de certains minéraux.

VII.4. Produits carnés et piscicoles fermentés

Les produits carnés et piscicoles fermentés sont répandus dans plusieurs régions du monde. Leur fermentation contribue à la conservation, au développement de la texture et à la formation d'arômes spécifiques. Les bactéries lactiques peuvent y limiter certains microorganismes indésirables, tandis que d'autres bactéries et enzymes interviennent dans la maturation et la formation du goût.

VII.5. Boissons fermentées

Les boissons fermentées comprennent les vins, bières, cidres, kombuchas et diverses boissons traditionnelles à base de céréales, de fruits ou de lait. Elles impliquent généralement des levures, des bactéries lactiques, des bactéries acétiques ou des consortia microbiens mixtes.

Le type de microorganisme dominant détermine le profil final en alcool, acides, gaz et composés aromatiques **(Singh & Kumar, 2025).**

VIII. Rôle des bactéries lactiques dans les produits fermentés traditionnels

Les bactéries lactiques occupent une place centrale dans de nombreux produits fermentés traditionnels. Leur capacité à transformer les sucres en acide lactique entraîne une baisse du pH, ce qui contribue à la stabilité microbiologique et à la conservation. Elles sont particulièrement importantes dans les produits laitiers fermentés, les légumes fermentés, certaines fermentations céréalières et plusieurs produits amylacés traditionnels **(Raimbault, 1995 ; Sionek *et al.*, 2023).**

VIII.1. . Acidification, stabilité et conservation

L'acidification rapide constitue l'un des rôles les plus importants des bactéries lactiques. Elle limite le développement de nombreux microorganismes d'altération ou pathogènes et oriente la fermentation vers un profil plus stable. Dans les fermentations traditionnelles du manioc, **Raimbault (1995)** souligne que la baisse rapide du pH et l'accumulation d'acide lactique contribuent fortement à la stabilisation du produit. Cette propriété est également recherchée dans les fermentations laitières et végétales.

VIII.2. Qualités organoleptiques

Les bactéries lactiques participent à la qualité sensorielle des produits fermentés par la production d'acide lactique, d'acétaldéhyde, de diacétyle, d'acétoïne, de peptides et d'acides aminés. Ces composés peuvent contribuer au goût acide, aux notes aromatiques, à la texture et parfois à la formation de composés volatils pendant l'affinage ou la maturation. Leur contribution dépend cependant de la souche, du substrat et des conditions de fermentation.

VIII.3. Digestibilité et intérêt nutritionnel

Dans plusieurs matrices, les bactéries lactiques contribuent à améliorer la digestibilité par l'hydrolyse partielle des protéines, des glucides complexes et de certains facteurs antinutritionnels. Dans les produits céréaliers ou amylacés, certaines fermentations lactiques peuvent contribuer à réduire les phytates et à améliorer la disponibilité de minéraux comme le fer ou le phosphore. Ces effets sont toutefois variables et doivent être évalués selon le produit, la souche et les conditions de procédé **(Raimbault, 1995 ; Ogrodowczyk & Drabińska, 2021).**

VIII.4. Cas des produits amylacés

Les produits amylacés, comme le manioc ou certaines céréales, représentent des matrices particulières car leur principal substrat est l'amidon. Dans ces produits, la fermentation peut être précédée ou accompagnée d'une activité amylasique permettant l'hydrolyse de l'amidon en sucres plus fermentescibles. **Raimbault (1995)** rapporte l'intérêt de bactéries lactiques amylolytiques, notamment dans la fermentation du manioc, car elles peuvent associer acidification, stabilisation et transformation du substrat. Cette approche reste intéressante pour l'amélioration de procédés traditionnels, à condition de contrôler les paramètres microbiologiques et sanitaires.

Chapitre III : Le Lait de Chèvre

I. Généralités

Le lait de chèvre est le produit de sécrétion mammaire de la chèvre laitière. Il représente une ressource alimentaire ancienne, particulièrement importante dans les régions rurales, montagneuses, steppiques et arides, où l'élevage caprin s'adapte mieux que l'élevage bovin aux conditions difficiles. À l'échelle scientifique, l'intérêt porté au lait caprin s'est renforcé en raison de sa richesse en protéines, minéraux, lipides à chaîne courte ou moyenne et composés bioactifs, mais aussi en raison de ses particularités technologiques par rapport au lait bovin **(Jenness, 1980 ; Clark & Mora García, 2017 ; Park *et al.*, 2017).**

Le lait de chèvre n'est pas un aliment universellement hypoallergénique. Sa digestibilité est généralement considérée comme favorable, mais une réactivité croisée avec les protéines du lait de vache peut exister chez certains sujets allergiques. De même, son intérêt fonctionnel dépend du mode de production, de l'état sanitaire des animaux, du traitement technologique et de la qualité microbiologique du lait cru **(Clark & Mora García, 2017 ; AlKaisy *et al.*, 2023).**

II. Composition physico-chimique du lait de chèvre

La composition du lait de chèvre varie selon la race, le stade de lactation, l'alimentation, la saison, l'état sanitaire de l'animal et les conditions d'élevage. En moyenne, il contient principalement de l'eau, du lactose, des lipides, des protéines, des minéraux et des vitamines.

Les valeurs rapportées dans la littérature sont proches de celles du lait bovin, mais le lait caprin se distingue par la structure de ses protéines, la taille de ses globules gras, son profil en acides gras et ses propriétés de coagulation **(Jenness, 1980 ; Mohsin *et al.*, 2019 ; Boumediene *et al.*, 2025).**

II.1. Fraction protéique

La fraction protéique du lait de chèvre comprend les caséines et les protéines du lactosérum. Par rapport au lait de vache, le lait caprin présente souvent des particularités dans les proportions de caséines, notamment une teneur variable en αs1-caséine selon le génotype. Cette variabilité influence la fermeté du gel, la synérèse, le rendement fromager et la texture des produits. Les protéines du lactosérum, telles que la β-lactoglobuline, l'α-lactalbumine, la lactoferrine et les immunoglobulines, contribuent à la valeur nutritionnelle et peuvent être à l'origine de peptides bioactifs après digestion ou fermentation **(Jenness, 1980 ; Clark & Mora García, 2017 ; AlKaisy *et al.*, 2023).**

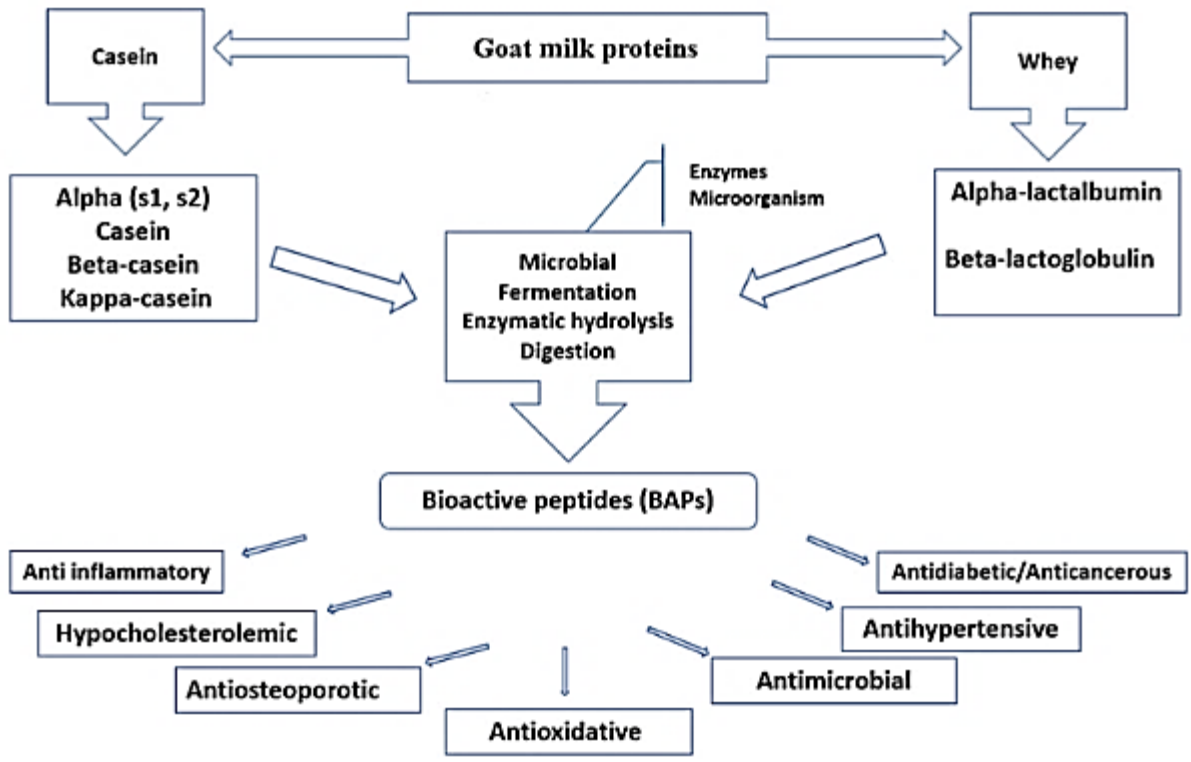


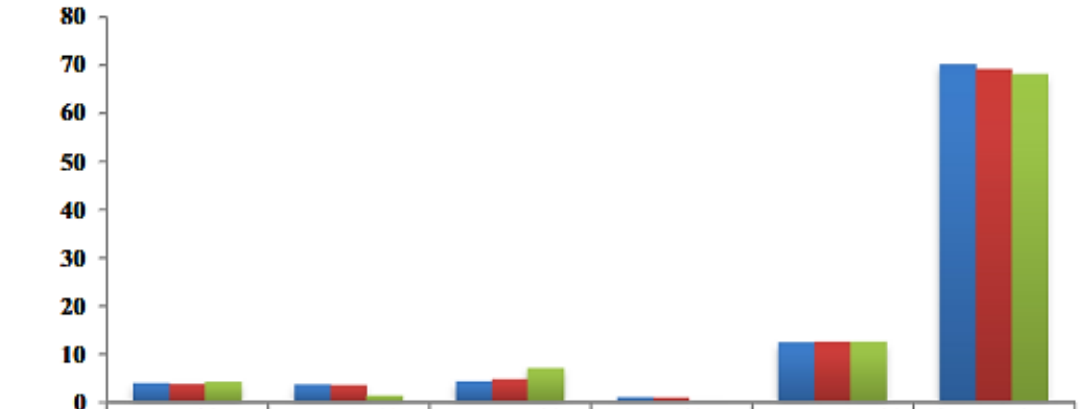
Figure 9. Protéines du lait de chèvre et bénéfices des peptides bioactifs (**AlKaisy *et al.*, 2023)**

II.2. Fraction lipidique

La matière grasse du lait de chèvre est caractérisée par une proportion notable d'acides gras à chaîne courte et moyenne, notamment les acides caproïque, caprylique et caprique, qui participent au goût typique du lait et des fromages caprins. La taille relativement réduite des globules gras est souvent associée à une meilleure dispersion de la matière grasse et à une digestion plus aisée. **(Mohsin *et al.*, 2019; Boumediene *et al.*, 2025).**

II.3. Glucides, minéraux et vitamines

Le lactose est le principal glucide du lait de chèvre. Il constitue le substrat essentiel de la fermentation lactique, car il est transformé par les bactéries lactiques en acide lactique, entraînant l'acidification du milieu. Le lait de chèvre est également une source intéressante de minéraux, notamment calcium, phosphore, potassium et magnésium. En revanche, la littérature signale une teneur relativement faible en folates et en vitamine B12 **(Jenness, 1980 ; Clark & Mora García, 2017 ; Rai *et al.*, 2022).**



	Fat (g)	Protein (g)	Lactose (g)	Ash (g)	Total solids (g)	Calories (cal)
Goat	3.8	3.5	4.1	0.8	12.2	70
Cow	3.6	3.3	4.6	0.7	12.3	69
Human	4	1.2	6.9	0.2	12.3	68

Figure 10. Concentrations moyennes des principaux nutriments dans le lait de chèvre, le lait de vache et le lait humain (par 100 g de lait) **(Park, 2010).**

III. Facteurs de variation de la composition

La composition du lait de chèvre n'est pas constante. La race est l'un des facteurs les plus importants, certaines races sont sélectionnées pour le rendement laitier, tandis que des races locales, souvent moins productives, peuvent présenter un lait plus concentré en certains constituants. Le stade de lactation modifie aussi la matière grasse, les protéines, la caséine, les minéraux et les acides gras. L'alimentation agit directement sur la quantité de lait produite, mais aussi sur le profil lipidique, notamment lorsque la ration est enrichie en sources lipidiques ou en fourrages spécifiques **(Abbas *et al.*, 2014 ; Mohsin *et al.*, 2019 ; Boumediene *et al.*, 2025).**

IV. Flore microbienne du lait de chèvre

Le lait cru de chèvre contient une microflore naturelle qui comprend des bactéries lactiques bénéfiques, mais aussi des microorganismes d'altération ou des contaminants sanitaires.

Les bactéries lactiques isolées du lait cru de chèvre peuvent appartenir à plusieurs genres, notamment *Lactococcus*, *Lactobacillus* au sens de l'ancienne nomenclature, *Leuconostoc*, *Streptococcus*, *Pediococcus* et *Enterococcus*. Ces microorganismes sont importants pour l'acidification, la production d'arômes, la protéolyse, la production éventuelle de composés antimicrobiens et la stabilisation des produits fermentés **(Badis *et al.*, 2004 ; Marroki *et al.*, 2011).**

V. Intérêt nutritionnel et fonctionnel

L'intérêt nutritionnel du lait de chèvre repose sur sa richesse en protéines de bonne valeur biologique, en minéraux et en lipides. Ses acides gras à chaîne courte et moyenne sont hydrolysés et absorbés plus rapidement que les acides gras à longue chaîne, ce qui contribue à sa réputation de lait digestible. La fermentation peut encore améliorer certaines propriétés, en réduisant le lactose, en augmentant l'acidité, en favorisant la formation de peptides bioactifs et en modifiant le profil aromatique **(Clark & Mora García, 2017 ; Biadała & Konieczny, 2018 ; Thakur *et al.*, 2024).**

Plusieurs travaux rapportent la présence de composés bioactifs dans le lait de chèvre, tels que des peptides issus des protéines, des oligosaccharides, la lactoferrine et certains lipides fonctionnels. Ces composés sont étudiés pour leurs activités antimicrobiennes, antioxydantes, immunomodulatrices ou antihypertensives **(AlKaisy *et al.*, 2023 ; Paszczyk *et al.*, 2023).**

VI. Aptitude technologique et transformation fermentaire

Le lait de chèvre peut être transformé en fromages frais, fromages affinés, yaourts, laits fermentés, kéfir, beurre et produits traditionnels. Son aptitude à la transformation dépend de sa teneur en matière sèche, de sa fraction caséinique, de son pH, de sa charge microbienne initiale et des cultures utilisées. Les gels obtenus à partir de lait de chèvre sont parfois plus fragiles que ceux du lait bovin, en raison de différences de composition et de structure micellaire ; cela peut se traduire par une texture plus molle, une synérèse plus importante ou un rendement fromager variable **(Jenness, 1980 ; Clark & Mora García, 2017 ; Park *et al.*, 2017).**

Partie Expérimentale

Matériel et Méthodes

Ce travail a été réalisé au sein des laboratoires de microbiologie et de biochimie du département des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Abdelhafid Boussouf de Mila, durant la période allant d'Avril à Juin 2026.

I. Matériel

I.1. Échantillons biologiques

Un volume total de 1,5 L de lait de chèvre cru a été prélevé de manière aseptique au cours de deux prélèvements distincts réalisés en Avril 2026. à Ain Fellous- Chelghoum Laid-Mila. Les légumes utilisés dans cette étude, à savoir le navet, la betterave et le chou-rave, ont été achetés dans un marché local au centre-ville d'Annaba. Après leur collecte, les échantillons ont été transportés au laboratoire dans des conditions hygiéniques appropriées.



Figure 11: Localisation géographique du site de collecte du lait de chèvre à Ain Fellous- Mila (Google Earth)

I.2. Souches pathogènes utilisées

L'activité antagoniste des isolats lactiques a été évaluée vis-à-vis des souches pathogènes de référence suivantes : *Escherichia coli* ATCC 25922 ; *Staphylococcus aureus* ATCC 25923; *Klebsiella pneumoniae* ATCC 700603 ; *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853.

Les souches ont été obtenues auprès du « Centre de Recherche en Sciences Pharmaceutiques » CRSP de Constantine. Elles ont été repiquées afin d'assurer leur pureté, puis maintenues sur gélose nutritive inclinée à 4 °C.

II. Méthodes

II.1. Préparation des produits fermentés

II.1.1. Préparation du Raïb

Le Raïb a été préparé selon la méthode traditionnelle locale, à partir de lait de chèvre utilisé comme matière première. Le lait frais a été transféré dans un récipient propre, puis maintenu à température ambiante (20-25 °C) pendant 48 heures. Cette préparation repose sur une fermentation spontanée, assurée par la microflore naturellement présente dans le lait.

Le produit obtenu, correspondant au Raïb traditionnel de lait de chèvre, a été utilisé comme échantillon fermenté dans la présente étude (figure12).

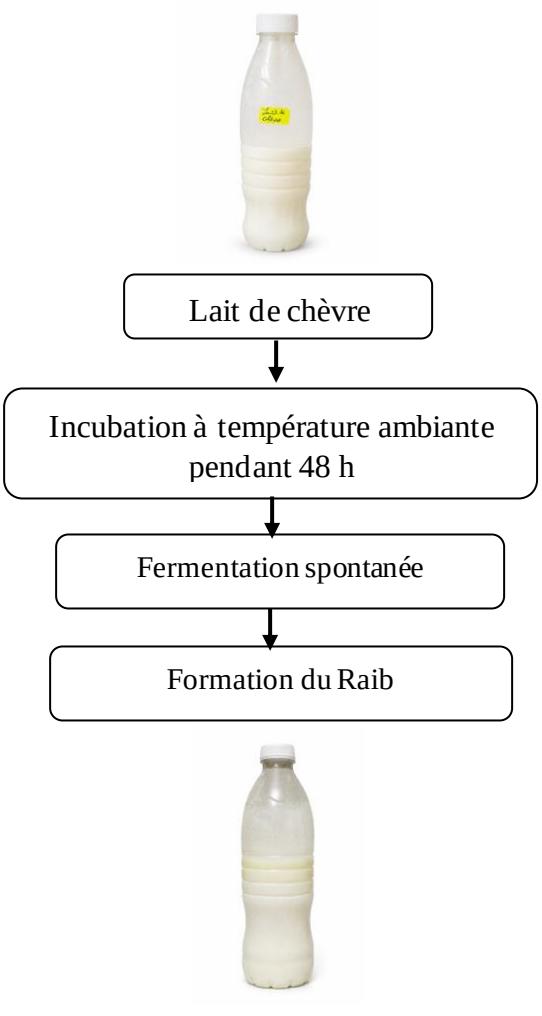


Figure 12. Diagramme de préparation traditionnelle du Raïb à partir du lait de chèvre

II.1.2. Préparation des légumes lactofermentés

Les légumes sélectionnés (navet, betterave et chou-rave), ont été soigneusement lavés à l'eau potable afin d'éliminer les impuretés superficielles. Ils ont ensuite été épluchés et

découpés en morceaux de taille homogène, puis introduits dans des bocaux en verre propres et préalablement désinfectés. Une saumure à 3 % de chlorure de sodium a été préparée en dissolvant 30 g de sel dans 1 L d'eau. Cette saumure a été ajoutée aux bocaux jusqu'à immersion complète des morceaux de légumes. Les bocaux ont ensuite été fermés et maintenus à température ambiante pendant cinq jours afin de favoriser le développement d'une fermentation lactique spontanée (Figure13).

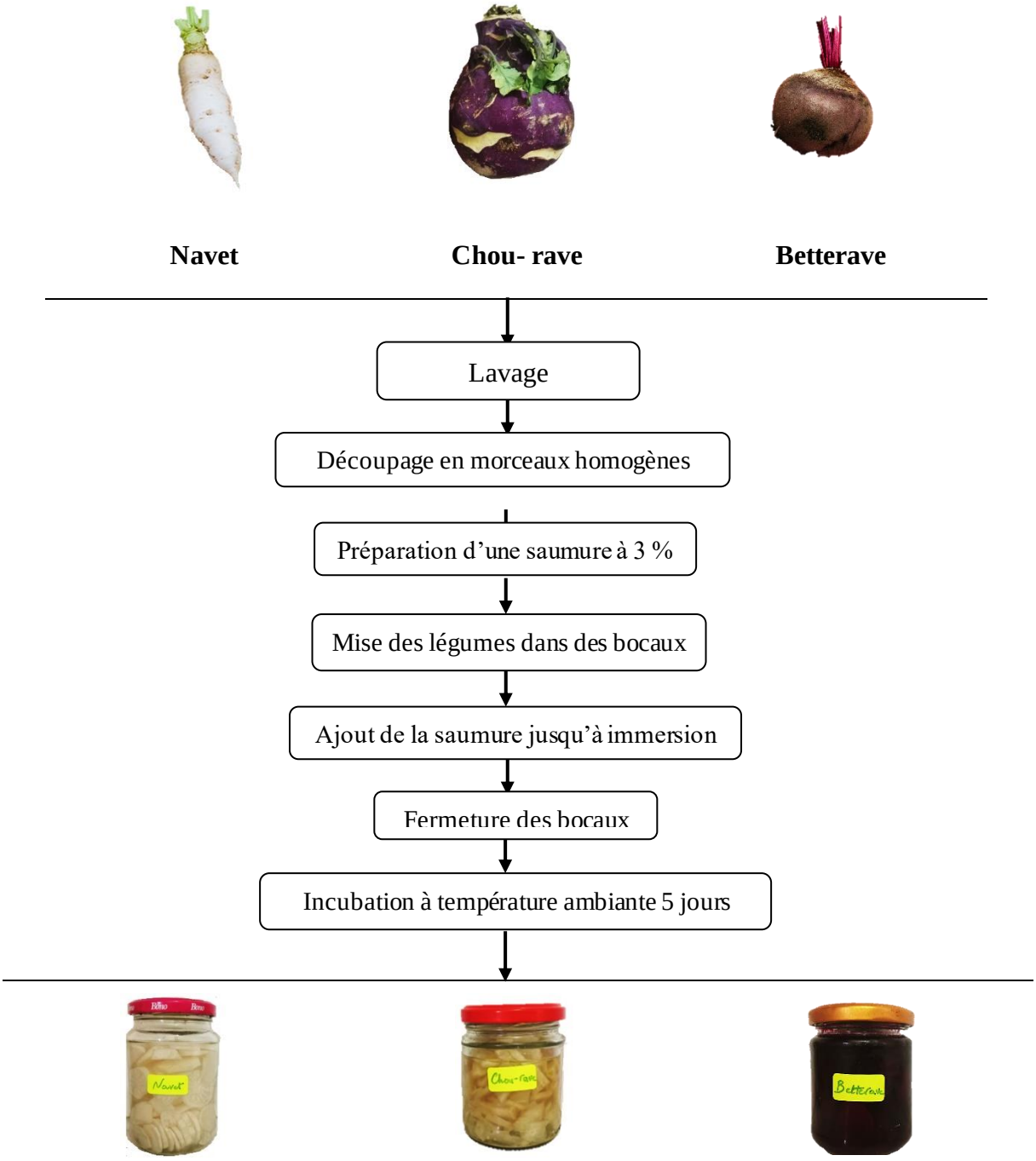


Figure 13. Diagramme des étapes de la lactofermentation des légumes

II.2. Isolement des bactéries lactiques sur milieu sélectif

L'isolement des bactéries lactiques a été réalisé sur milieu MRS gélosé, couramment utilisé pour la culture et la sélection des bactéries lactiques. À partir des dilutions appropriées du Raïb et des saumures issues des légumes fermentés, un volume de 0,1 mL de chaque dilution a été déposé à la surface des boîtes de Pétri contenant le milieu MRS.

L'ensemencement a été effectué par étalement en surface à l'aide d'un râteau stérile. Les boîtes ont ensuite été incubées à 37 °C pendant 24 à 48 heures. Après incubation, les colonies présentant des caractères morphologiques compatibles avec ceux des bactéries lactiques ont été sélectionnées.

II.3. Purification des isolats

Les colonies sélectionnées ont été isolées individuellement par repiquages successifs sur gélose MRS, selon la méthode des quadrants. Les boîtes ensemencées ont été incubées à 37 °C pendant 24 à 48 heures. Cette opération a été répétée jusqu'à l'obtention de cultures pures, caractérisées par une homogénéité morphologique des colonies.

La pureté des isolats a été vérifiée sur la base de plusieurs critères complémentaires : l'uniformité de la morphologie coloniale, l'observation microscopique après coloration de Gram, ainsi que le résultat négatif au test de la catalase. Ces critères sont compatibles avec le profil présomptif des bactéries lactiques, généralement Gram positives et catalase négatives **(Stiles & Holzapfel, 1997).**

II.4. Conservation des isolats

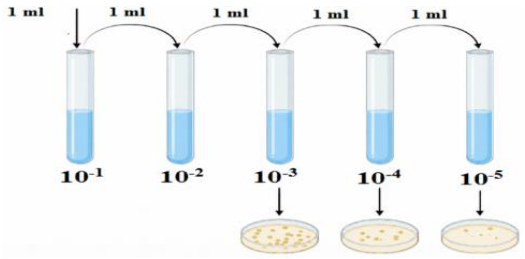
Deux modes de conservation ont été appliqués selon la durée de stockage souhaitée. Pour la conservation à court terme, les isolats purs ont été repiqués sur gélose MRS inclinée, incubés à 37 °C pendant 18 à 24 heures, puis conservés à 4 °C. Pour la conservation à long terme, les isolats ont été cultivés en bouillon MRS pendant 18 à 24 heures.

Après incubation, la biomasse bactérienne a été récupérée par centrifugation à 4000 tr/min pendant 10 minutes. Le surnageant a été éliminé, puis le culot bactérien a été resuspendu dans une solution stérile composée de 70 % de lait écrémé et de 30 % de glycérol.

Les suspensions bactériennes ainsi obtenues ont été réparties dans des microtubes stériles, puis conservées à -20 °C afin de maintenir la viabilité des isolats sur une période prolongée.



Prélever 1 ml de Raib/ saumures des légumes lactofermentés



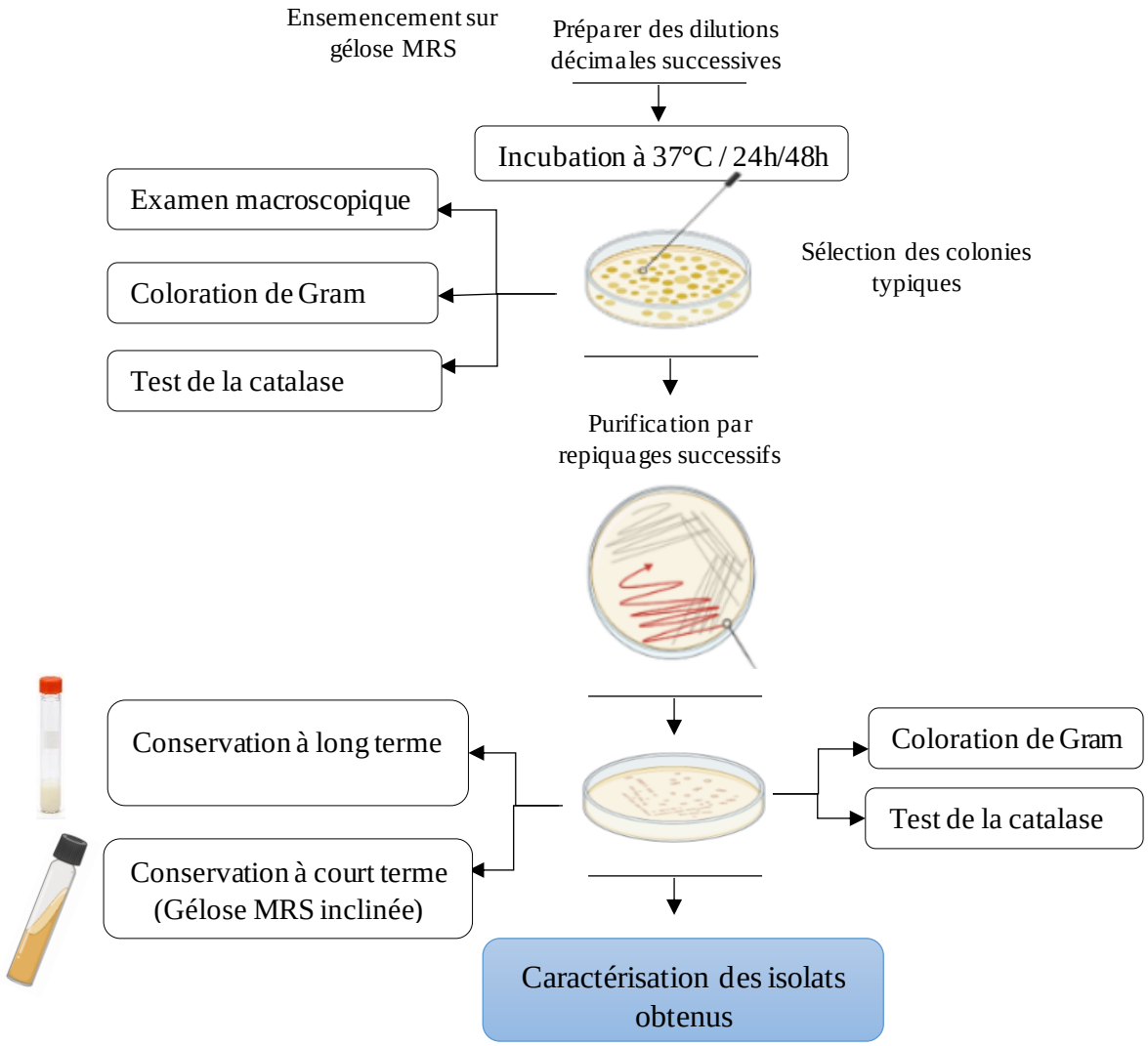


Figure 14. Diagramme d'isolement des souches lactiques à partir du Raib et des saumures des légumes fermentés

II.5. Caractérisation des souches des isolats

L'identification des isolats obtenus a été considérée comme présomptive. En effet, en l'absence d'une identification phénotypique approfondie par galerie API 50 CHL et/ou d'une confirmation moléculaire, notamment par séquençage du gène codant l'ARNr 16S, les isolats ne peuvent pas être attribués de manière définitive à une espèce donnée. Ainsi, la caractérisation des isolats a reposé sur l'étude de leurs caractères morphologiques, microscopiques, physiologiques et biochimiques.

II.5.1. Caractérisation morphologique

II.5.1.1. Examen macroscopique des colonies

L'examen macroscopique a été réalisé à partir de colonies jeunes cultivées sur gélose MRS. Pour chaque isolat, les principaux caractères culturaux ont été relevés, notamment la taille, la forme, la couleur, le relief, l'aspect des bords, la surface, l'opacité ainsi que la consistance des colonies.

II.5.1.2. Coloration de Gram

Un frottis bactérien a été préparé à partir de cultures jeunes âgées de 18 à 24 heures. Après fixation à la chaleur, la coloration de Gram a été réalisée selon la méthode classique. Cette observation a permis de déterminer la morphologie cellulaire ainsi que le mode de groupement des cellules bactériennes : bacilles isolés ou disposés en chaînettes, coques isolées, en paires, en chaînettes ou en tétrades. Les isolats retenus comme bactéries lactiques présomptives devaient présenter une coloration de Gram positive.

II.5.1.3. Test de la catalase

Le test de la catalase a été réalisé en déposant une goutte de peroxyde d'hydrogène à 3 % sur une lame propre. Une colonie jeune a ensuite été prélevée à l'aide d'une anse stérile puis émulsionnée dans la goutte de H_2O_2. L'apparition immédiate de bulles traduit une réaction catalase positive, tandis que l'absence de dégagement gazeux indique une réaction catalase négative **(MacFaddin, 2000).**

II.5.2. Caractérisation physiologique et biochimique

II.5.2.1. Croissance à différentes températures

La capacité de croissance des isolats à différentes températures a été évaluée en inoculant chaque isolat dans des tubes contenant du bouillon MRS. Les tubes ont été incubés à 4 °C, 30

°C, 37 °C et 45 °C. La croissance bactérienne a été appréciée par l'apparition d'un trouble visible dans le milieu, par comparaison avec un témoin non ensemencé. Les lectures ont été effectuées après 24, 48 et 72 heures d'incubation **(Hanoun *et al.*, 2023)**.

II.5.2.2. Croissance en présence de NaCl

La tolérance au chlorure de sodium a été étudiée dans des bouillons MRS supplémentés avec différentes concentrations de NaCl : 2,5 %, 4 % et 6,5 %. Les milieux ont été inoculés avec une culture jeune de chaque isolat, puis incubés à 30 °C pendant 24 à 72 heures. La croissance a été évaluée par l'apparition d'un trouble visible, en comparaison avec un témoin non ensemencé **(Hanoun *et al.*, 2023)**.

II.5.2.3. Croissance à pH acide et alcalin

La tolérance des isolats aux variations de pH a été évaluée dans des bouillons MRS ajustés à pH 4 et à pH 9,6. Les milieux ont été inoculés avec une culture jeune de chaque isolat, puis incubés à 30 °C pendant 24 à 72 heures. La croissance a été déterminée par l'apparition d'un trouble visible dans le milieu de culture

II.5.2.4. Thermorésistance

La thermorésistance des isolats a été étudiée en inoculant chaque isolat dans un tube de bouillon MRS. Les tubes inoculés ont été soumis à un traitement thermique dans un bain-marie réglé à 63,5 °C pendant 30 minutes. Après traitement, les tubes ont été rapidement refroidis, puis incubés à 30 °C pendant 48 à 72 heures. L'apparition d'un trouble après incubation a été considérée comme un indicateur de survie au traitement thermique **(Hanoun *et al.*, 2023)**.

II.5.2.5. Type fermentaire

Inoculer chaque isolat dans un bouillon MRS contenant du glucose et un tube de Durham inversé. Incuber à 30 °C pendant 24 à 48 h. L'absence de gaz dans le tube de Durham indique un profil homofermentaire présomptif. La présence de gaz indique un profil hétérofermentaire présomptif.

II.6. Recherche des caractères technologiques

II.6.1. Pouvoir acidifiant

Le pouvoir acidifiant des isolats a été évalué dans du lait écrémé stérile à 10 %. Chaque flacon a été ensemencé avec 1 % (v/v) d'une culture jeune de l'isolat à tester, puis incubé à 37 °C pendant 24 h. Le pH a été mesuré au cours de l'incubation, notamment à 0 h, 2 h, 6 h et 24

h, afin de suivre la cinétique d'acidification. Le pouvoir acidifiant a été exprimé par la diminution du pH au cours du temps, selon la relation suivante **(Akabanda *et al.*, 2014)** :

$$\Delta pH = pH\ initial - pH\ final$$

II.6.2. Production d'acétoïne

La production d'acétoïne a été étudiée par le test de Voges-Proskauer sur milieu Clark et Lubs. Le milieu a été inoculé avec chaque isolat, puis incubé à 30 °C pendant 24 à 48 h. Après incubation, les réactifs VP ont été ajoutés.

L'apparition d'une coloration rose à rouge a été considérée comme une réaction positive, indiquant la production d'acétoïne **(Avril *et al.*, 1992)**.

II.6.3. Mise en évidence qualitative de la production d'exopolysaccharides

La capacité des isolats à produire des exopolysaccharides a été évaluée qualitativement sur gélose MRS supplémentée en saccharose (10%). Les isolats ont été ensemencés par stries ou par spots, puis incubés à 30 °C pendant 48 à 72 h. Les colonies présentant un aspect mucoïde, visqueux ou filant ont été considérées comme positives pour une production apparente d'exopolysaccharides. Les colonies non mucoïdes et non filantes ont été considérées comme négatives **(Milliere *et al.*, 1989).**

II.7. Estimation du pouvoir antibactérien

II.7.1. Souches indicatrices utilisées

L'activité antibactérienne des isolats lactiques a été évaluée vis-à-vis de souches bactériennes indicatrices : *Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Pseudomonas aeruginosa* et *Klebsiella pneumoniae*. Avant la réalisation des tests d'antagonisme, chaque souche indicatrice a été activée dans un bouillon nutritif pendant 24 heures à 37 °C.

Les suspensions bactériennes obtenues ont ensuite été ajustées à une turbidité équivalente à 0,5 McFarland, afin d'obtenir une concentration bactérienne standardisée pour l'ensemble des essais.

II.7.2. Préparation des surnageants des isolats lactiques

Chaque isolat lactique a été cultivé dans un bouillon MRS pendant 18 à 24 heures. Après incubation, les cultures ont été centrifugées à 10 000 g pendant 15 minutes. Les surnageants ont été récupérés, puis filtrés à travers des filtres stériles de 0,45 µm afin d'éliminer les cellules bactériennes résiduelles.

Les surnageants acellulaires ainsi obtenus ont été utilisés immédiatement pour l'évaluation de l'activité antibactérienne **(Hanoun *et al.*, 2023).**

II.7.3. Méthode de diffusion en puits

L'activité antibactérienne a été évaluée par la méthode de diffusion en puits sur gélose Mueller-Hinton. La surface des boîtes de Pétri contenant la gélose Mueller-Hinton a été ensemencée avec les suspensions standardisées des souches indicatrices à l'aide d'un écouvillon stérile. Après séchage de la surface du milieu, des puits de 6 mm de diamètre ont été réalisés aseptiquement à l'aide d'un embout stérile ou d'un emporte-pièce stérile. Ensuite, un volume de 100 µL de surnageant acellulaire de chaque isolat lactique a été déposé dans les puits. Les boîtes ont ensuite été incubées à 37 °C pendant 24 heures.

Après incubation, l'activité antibactérienne a été évaluée par la mesure du diamètre des zones d'inhibition autour des puits, exprimé en millimètres.

Tableau 1 : Niveaux de sensibilité des souches en fonction des diamètres des zones d'inhibition

Diamètre de la zone d'inhibition	**Interprétation**
7–8 mm	Faible inhibition
9–14 mm	Inhibition modérée
15–19 mm	Forte inhibition
≥ 20 mm	Très forte inhibition

II.8. Évaluation du potentiel starter des isolats R1 et N en fabrication de fromage frais

Un essai de fabrication de mini-fromages frais a été réalisé afin d'évaluer le potentiel starter de deux isolats sélectionnés : R1, issu du raïb de lait de chèvre, et N, isolé à partir de navets lactofermentés. Ces isolats ont été retenus en raison de leurs propriétés technologiques mises en évidence lors des essais précédents, notamment leur capacité d'acidification.

Quatre lots expérimentaux ont été préparés à partir du même lait de chèvre : T(−), constitué de lait de chèvre additionné de présure ; T(+), constitué de lait de chèvre additionné d'un ferment commercial et de présure ; R1, constitué de lait de chèvre additionné de l'isolat R1 et de présure ; et N, constitué de lait de chèvre additionné de l'isolat N et de présure.

Le lait de chèvre a été pasteurisé à 63–65 °C pendant 30 min, puis refroidi rapidement jusqu'à environ 37 °C. Il a ensuite été réparti à raison de 40 mL par flacon. Le pH initial du lait de chèvre pasteurisé a été mesuré avant l'ensemencement.

Les lots R1 et N ont été inoculés respectivement avec 1 % (v/v) des cultures actives des isolats correspondants. Le lot T(+) a été ensemencé avec le ferment commercial, tandis qu'aucun ferment n'a été ajouté au lot T(−). Après inoculation, les flacons ont été incubés à 37 °C pendant 1 h afin de permettre l'adaptation des bactéries et le début de l'acidification.

Le chlorure de calcium $CaCl_2$ a ensuite été ajouté à 0,01 % aux lots destinés à la coagulation enzymatique. Les échantillons ont été laissés au repos pendant 15 min avant l'ajout de la présure. La présure a été ajoutée selon la dose recommandée par le fabricant, soit 0,1 % (v/v). Les échantillons ont été mélangés doucement pendant 5 à 10 **s**, puis incubés à 37 °C. La coagulation a été contrôlée après 60 min.

Lorsque le caillé était formé, il a été découpé délicatement à l'aide d'une spatule stérile afin de favoriser l'expulsion du lactosérum. Les caillés ont ensuite été laissés au repos pendant 10 min, puis égouttés séparément sur gaze stérile. Le lactosérum de chaque lot a été récupéré séparément **(Pappa *et al.*, 2022)**

Les différents lots ont été évalués sur la base de critères technologiques, notamment l'évolution du pH, l'aptitude à la coagulation, l'aspect du caillé et le rendement fromager. Après égouttage, les caillés ont été pesés afin de calculer le rendement fromager selon la formule suivante :

Rendement fromager (%) = Masse du caillé obtenu/Masse initiale du lait transformé ×100

Le pH du lactosérum a ensuite été mesuré pour chaque lot afin d'apprécier l'acidification finale liée à l'activité du ferment commercial ou des isolats testés. Les fromages obtenus ont été placés dans des récipients stériles étiquetés, puis conservés à 4 °C pour les observations ultérieures à 24 h.

II.9. Analyse statistique

Les résultats ont été exprimés sous forme de moyenne ± écart-type. Les différences entre les lots ont été analysées par une analyse de variance à un facteur (ANOVA), suivie du test post-hoc de Tukey lorsque la différence était significative. Le seuil de signification a été fixé à $p < 0,05$.

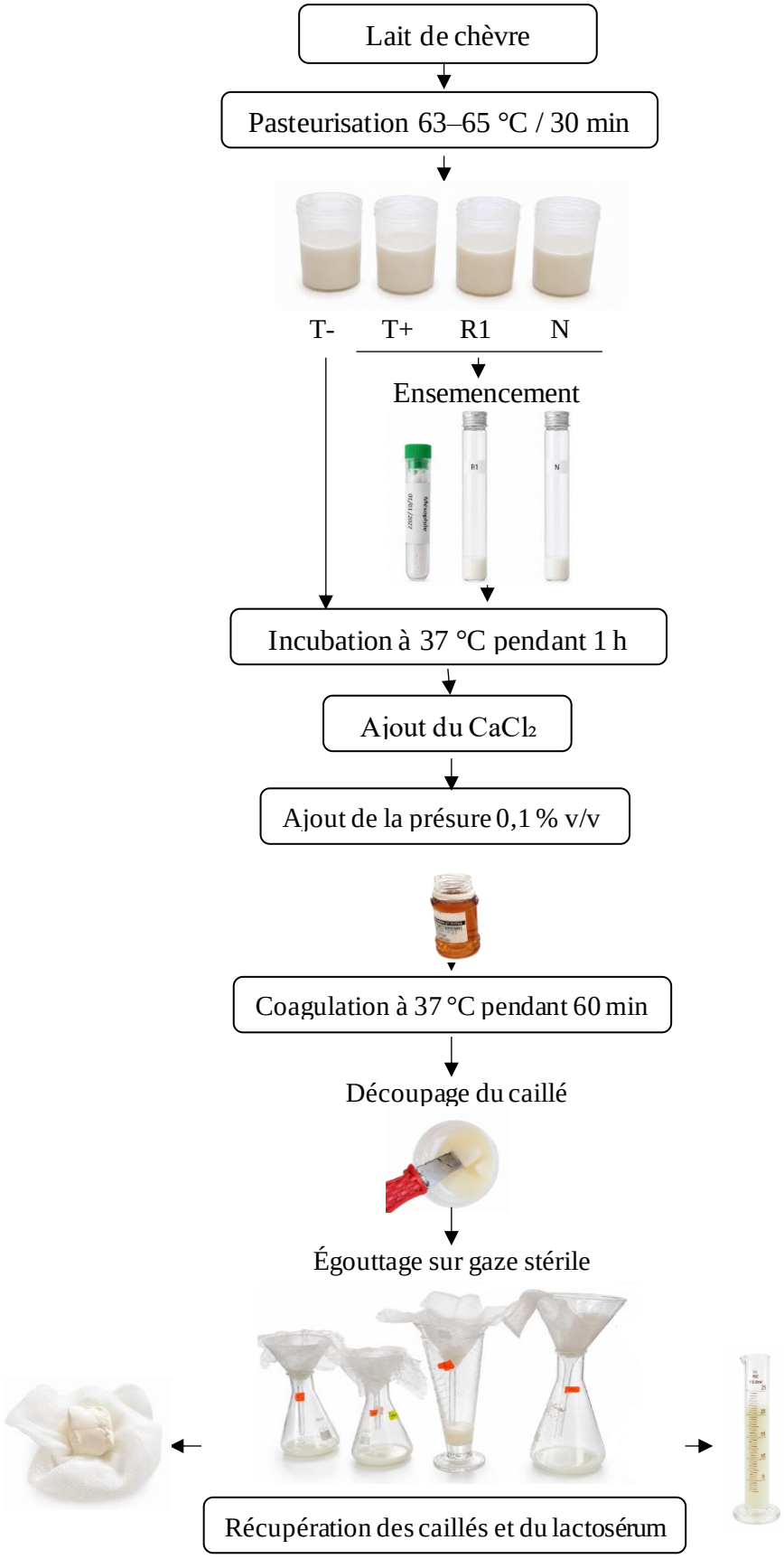


Figure 15. Diagramme de fabrication expérimentale du fromage frais

Résultats et Discussion

I. Résultats

I.1. Isolement des bactéries lactiques

I.1.1. Caractérisation macroscopique et microscopique des colonies isolées

L'aspect macroscopique des colonies obtenues sur gélose MRS variait d'une souche à l'autre. Les colonies présentaient une forme circulaire, des contours réguliers, une surface lisse à crémeuse et une coloration blanchâtre à crème. Leur taille était variable, allant de petites colonies ponctiformes à des colonies plus développées.

Cinq isolats ont été retenus comme bactéries lactiques présumées sur la base de leurs caractéristiques morphologiques et biochimiques préliminaires. Il s'agit de deux isolats issus du raïb, notés R1 et R2, d'un isolat provenant du chou-rave (C), d'un isolat issu de la betterave, (B), et d'un isolat provenant des navets lactofermentés (N).

Sur le plan microscopique, l'isolat R1 est apparu sous forme de bacilles courts, disposés en paires ou en chaînettes. L'isolat R2 a montré des cellules coccobacillaires courtes, disposées en paires ou en petites chaînettes irrégulières. L'isolat C s'est présenté sous forme de bacilles disposés principalement en paires. L'isolat B a été observé sous forme de bacilles disposés en en petits groupements. Enfin, l'isolat N a révélé des bacilles courts à moyens, disposés en paires ou en petites chaînettes (tableau)

Tableau 2 : Caractéristiques morphologiques des isolats sélectionnés

Isolat	Origine de prélèvement	Gram	Forme	Disposition
R1	Raïb du lait de chèvre	+	Bacilles courts	En paires ou en chaînettes
R2	Raïb du lait de chèvre	+	Coccobacilles courts	En paires ou en petites chaînettes irrégulières
C	Chou-rave	+	Bacilles courts	En paires ou en petites chaînettes irrégulières
B	Betterave	+	Bacilles allongés	En amas, chaînettes courtes
N	Navet	+	Bacilles courts à moyens	En paires ou en petites chaînettes

I.1.2. Caractérisation biochimique et physiologique

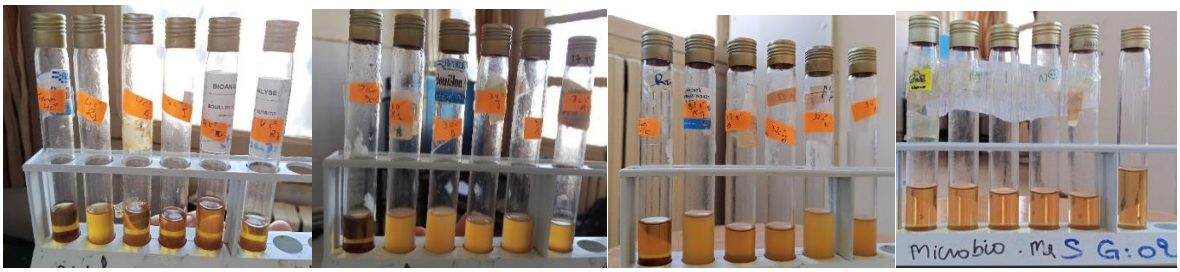
La caractérisation des isolats bactériens a été réalisée à travers l'étude de quelques propriétés biochimiques et physiologiques, notamment le test de la catalase et la capacité de croissance à différentes températures. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3.

I.1.2.1. Recherche de la catalase

Le test de la catalase réalisé sur les cinq isolats n'a montré aucun dégagement gazeux après l'ajout de peroxyde d'hydrogène. L'absence de formation de bulles indique une réaction négative. Ce résultat est compatible avec les caractéristiques générales des bactéries lactiques, généralement décrites comme catalase négatives.

I.1.2.2. Croissance à différentes températures

Les cinq isolats ont montré une croissance positive à 4 °C, 30 °C et 37 °C, traduite par l'apparition d'un trouble visible dans le bouillon MRS par comparaison avec le témoin non ensemencé. Ce trouble a été observé dès 24 h d'incubation, puis confirmé après 48 h et 72 h. À 45 °C, seuls les isolats R1, N et C ont présenté une croissance positive, tandis que les isolats B et R2 n'ont pas montré de croissance visible. **(Photographie 01)**

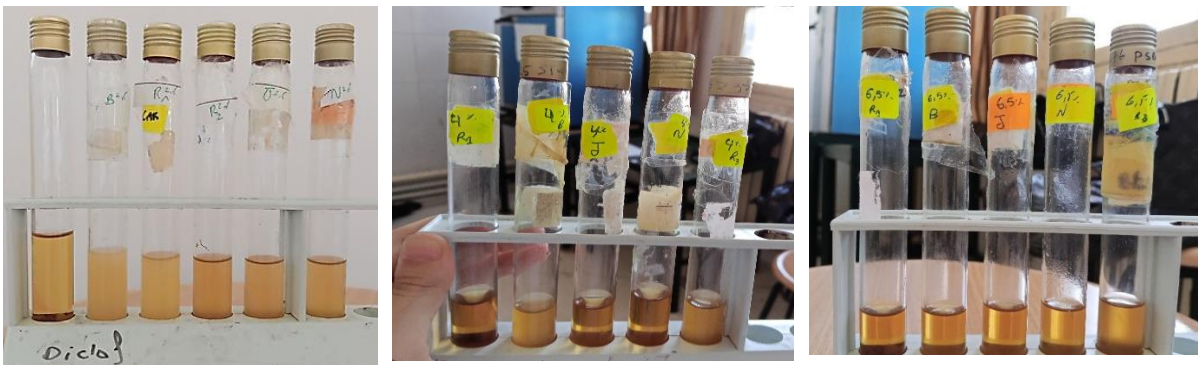


4°C **30°C** **37°C** **45°C**

Photographie 1 : Croissance des isolats à différentes températures

I.1.2.3. Croissance en présence de NaCl

La tolérance au NaCl des cinq isolats (B, C, N, R1 et R2) a été évaluée en bouillon MRS supplémenté avec différentes concentrations de chlorure de sodium. Les cinq isolats ont présenté une croissance positive en présence de 2,5 % et 4 % et 6,5% de NaCl, mise en évidence par l'apparition d'un trouble visible dans le milieu de culture. **(Photographie 02)**



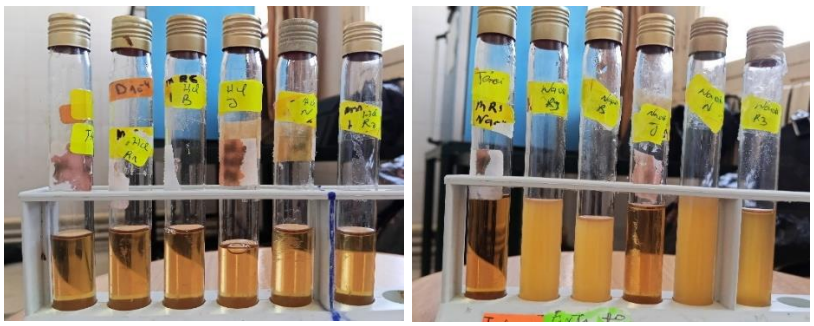
2,5% NaCl 4% NaCl 6,5% NaCl

Photographie 2 : La croissance des isolats à différentes concentrations de NaCl

I.1.2.4. Croissance à pH acide et alcalin

La capacité de croissance des cinq isolats à différents pH a été évaluée en bouillon MRS ajusté à différents pH. À pH 9.6, les cinq isolats ont présenté une croissance positive, mise en évidence par l'apparition d'un trouble visible dans le milieu de culture par comparaison avec le témoin non ensemencé.

La croissance à pH acide a montré une différence de tolérance entre les isolats. À pH 4, seul l'isolat R2 a présenté une croissance positive faible, mise en évidence par un léger trouble du milieu. Les autres isolats (R1, C, B et N) n'ont pas montré de croissance visible, le milieu restant clair **(Photographie 03).**

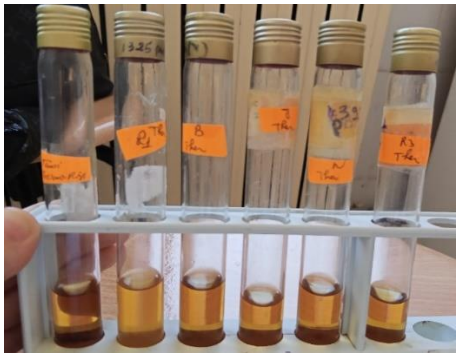


pH 4 pH 9.6

Photographie 3 : Croissance des isolats à pH acide et alcalin

I.1.2.5. Test de thermorésistance

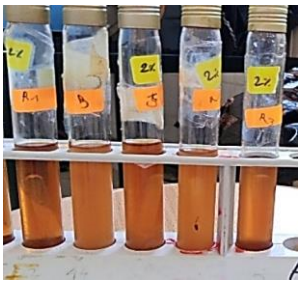
Les résultats du test de thermorésistance montrent qu'après un traitement thermique à 63,5 °C pendant 30 min, suivi d'une incubation à 30 °C pendant 48 à 72 h, quatre isolats (B, C, R1 et R2) ont présenté une croissance positive. Celle-ci a été mise en évidence par l'apparition d'un trouble visible dans le milieu de culture. L'isolat N n'a montré aucune croissance après le traitement thermique, le milieu étant resté clair **(Photographie 04).**



Photographie 4 : Évaluation de la thermorésistance des isolats après traitement à 63,5 °C pendant 30 min

I.1.2.6. Type fermentaire

Après incubation des cinq isolats dans un bouillon MRS contenant du glucose et muni d'une cloche de Durham inversée, la production de gaz a été recherchée afin d'orienter la détermination du type fermentaire des isolats. Les isolats N, B et R2 n'ont montré aucune accumulation de gaz dans la cloche de Durham. Cette absence de production gazeuse suggère un profil homofermentaire présumé, caractérisé principalement par la production d'acide lactique à partir du glucose. En revanche, les isolats C et R1 ont présenté une production de gaz, mise en évidence par la présence d'une bulle dans la cloche de Durham. Ce résultat indique un profil hétérofermentaire présumé, associé à la production d'acide lactique accompagnée de CO_2 et d'autres métabolites tels que l'éthanol ou l'acide acétique **(Photographie 05)**



Photographie 5 : Mise en évidence du profil fermentaire des isolats

Tableau 3 : Récapitulatif des caractéristiques biochimiques et physiologiques des isolats

	R1	**R2**	**C**	**B**	**N**
Catalase	–	–	–	–	–
Croissance à différentes températures	4° +	+	+	+	+
	30° +	+	+	+	+
	37° +	+	+	+	+
	45° +	–	+	–	+
Croissance à différentes concentrations de NaCl	2,5% +	+	+	+	+
	4% +	+	+	+	+
	6,5% +	+	+	+	+
Croissance à pH acide et alcalin	4 –	+	–	–	–
	9,6 +	+	+	+	+
Thermorésistance	+	+	+	+	–
Type de fermentation	+	–	+	–	–

I.1.3. Orientation phénotypique présomptive des isolats lactiques

L'analyse des caractères morphologiques, biochimiques et physiologiques permet une orientation présomptive des isolats selon le schéma de différenciation des bactéries lactiques. Les cinq isolats étudiés sont Gram positifs, catalase négatifs et présentent une morphologie

principalement bacillaire à coccobacillaire, ce qui les oriente vers le groupe des bactéries lactiques bacillaires présumées.

La production de gaz à partir du glucose a permis de distinguer deux profils fermentaires. Les isolats R1 et C, producteurs de gaz, présentent un profil compatible avec des lactobacilles hétérofermentaires présumés. À l'inverse, les isolats R2, B et N, non producteurs de gaz, peuvent être rapprochés des lactobacilles homofermentaires présumés. La croissance à 45 °C observée chez R1, C et N traduit une certaine thermotolérance, tandis que R2 et B présentent un profil plus mésophile.

Cette orientation reste présomptive, car l'identification au genre ou à l'espèce ne peut pas être confirmée uniquement par les caractères phénotypiques. Une identification biochimique complémentaire ou moléculaire serait nécessaire pour confirmer l'appartenance taxonomique des isolats.

I.1.4. Évaluation des propriétés technologiques des isolats sélectionnés

I.1.4.1. Pouvoir acidifiant

L'évaluation du pouvoir acidifiant des cinq isolats étudiés a montré une diminution importante du pH du lait après 24 h d'incubation (figure 16). Le pH initial, proche de 6,6, a été abaissé à des valeurs comprises entre 4,34 et 4,79 selon les isolats (tableau 04). L'analyse statistique n'a pas montré de différence significative entre les isolats pour le pH à 24 h (p : 0,20). Toutefois, les valeurs moyennes suggèrent une tendance à une acidification plus marquée pour N et R1. L'isolat N, issu du navet, présente le pouvoir acidifiant le plus élevé, avec un pH final de 4,34 et une variation de pH de 2,25. Il est suivi de très près par l'isolat R1, issu du Raïb de lait de chèvre, qui atteint un pH de 4,35 avec un ΔpH de 2,23. Les isolats B et C présentent également une bonne capacité d'acidification, avec des pH finaux respectifs de 4,41 et 4,49. En revanche, l'isolat R2 montre le pouvoir acidifiant le plus faible, avec un pH final de 4,79 et un ΔpH de 1,81. Cette valeur indique une activité acidifiante plus limitée par rapport aux autres isolats.

Tableau 4 : Valeurs du pH à 24 h et du pouvoir acidifiant (ΔpH) des isolats étudiés

Isolat	pH à 24h	Δ ph
R1	4.35 ± 0.15	2,23
R2	4,79 ± 0.19	1,81
C	4,49 ± 0.25	2,10
B	4,41 ± 0.15	2,18
N	4,34 ± 0.1	2,25

La cinétique d'acidification montre que la baisse du pH est particulièrement marquée durant les premières heures d'incubation. L'isolat R1 se distingue par une acidification rapide, atteignant un pH bas dès 6 h, tandis que les autres isolats présentent une diminution plus progressive. Le témoin, quant à lui, garde un pH presque stable autour de 6,5, ce qui confirme que l'acidification observée est due à l'activité des isolats inoculés. Les isolats B et C présentent également un potentiel intéressant, alors que R2 semble moins adapté pour assurer seul une acidification efficace du lait de chèvre.

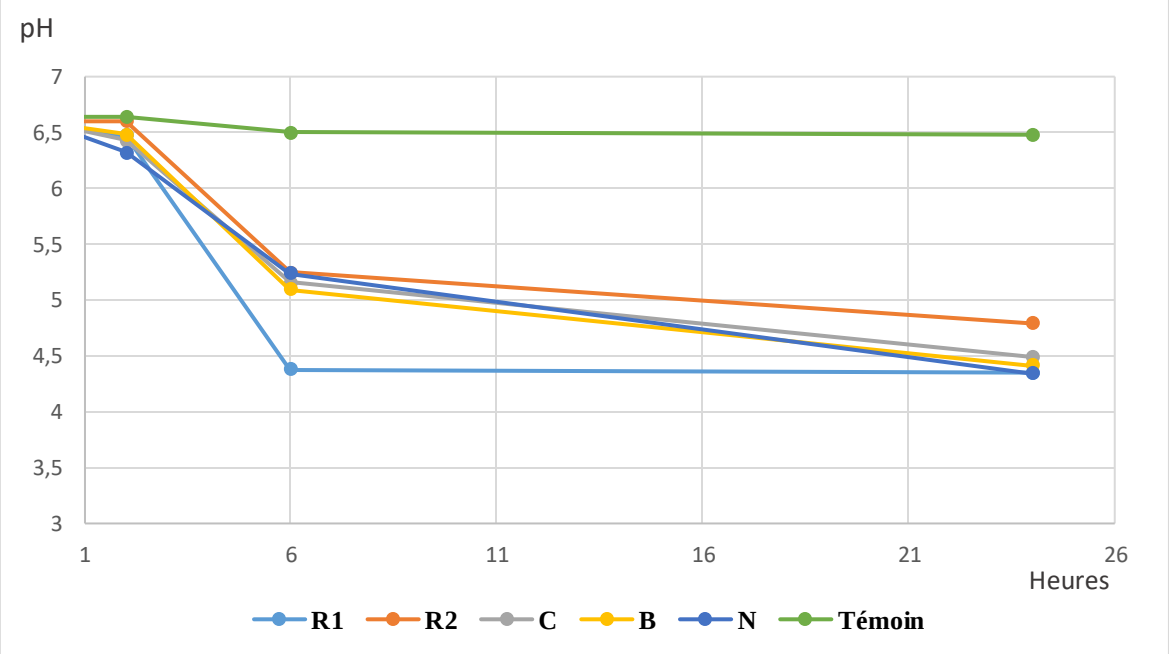
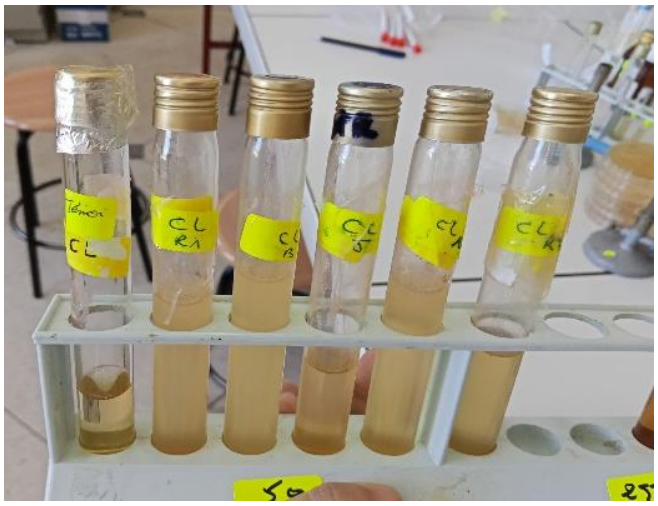


Figure 16. Pouvoir acidifiant des cinq isolats

I.1.4.2. Production d'acétoïne

Les résultats du test de Voges-Proskauer ont montré que les isolats B, N, R1 et R2 présentent une réaction positive (VP+), caractérisée par l'apparition d'une coloration rose à rouge. Cette réaction indique la production d'acétoïne, métabolite intermédiaire pouvant être associé à la formation de composés aromatiques tels que le diacétyle.

L'isolat C a présenté une réaction négative (VP−), traduite par l'absence de coloration après ajout des réactifs. **(Photographie06).**



Photographie 6 : Production d'acétoïne/diacétyle

I.1.4.3. Mise en évidence qualitative de la production d'exopolysaccharides

La production d'exopolysaccharides par les isolats étudiés a été évaluée qualitativement à partir de l'aspect macroscopique des cultures. Cette évaluation repose principalement sur l'observation de la viscosité du milieu et de l'apparition d'un aspect filant, généralement associés à la synthèse d'EPS par certaines bactéries lactiques **(figure 17).**

Les résultats obtenus montrent que les isolats B, N et C présentent une production apparente d'exopolysaccharides, avec des intensités variables. L'isolat B, issu de la betterave, s'est distingué par l'aspect le plus visqueux. Les isolats N et C ont également montré une production d'EPS, mais avec une intensité moyenne. Leur aspect visqueux était moins marqué que celui observé pour l'isolat B, ce qui indique une production modérée d'exopolysaccharides. Cependant, les isolats R1 et R2 n'ont pas présenté d'aspect visqueux ou filant dans les conditions expérimentales utilisées. Ils peuvent donc être considérés comme non producteurs apparents d'EPS.



B N C

Figure 17. Évaluation qualitative de la production d'exopolysaccharides

I.1.5. Evaluation de l'activité antibactérienne

L'activité antibactérienne des cinq isolats étudiés a été évaluée par la mesure du diamètre des zones d'inhibition vis-à-vis de quatre bactéries pathogènes **(figure 18).** L'isolat R1, issu du raïb de lait de chèvre, a présenté l'activité antibactérienne la plus importante parmi les isolats testés. Il a inhibé toutes les bactéries pathogènes étudiées, avec des diamètres d'inhibition allant de 8,00 à 18,25 mm.

L'activité la plus élevée a été observée contre *S. aureus*, avec une zone d'inhibition de 18,25 mm, ce qui indique une forte sensibilité de cette bactérie à l'égard de R1. Cet isolat a également montré une activité modérée contre *P. aeruginosa* avec 11,00 mm, ainsi qu'une activité plus faible contre *E. coli* et *K. pneumoniae,* avec respectivement 8,75 mm et 8,00 mm.

L'isolat R2, également issu du raïb de lait de chèvre, a montré une activité antibactérienne plus limitée que R1. Il a présenté une inhibition de *P. aeruginosa* avec un diamètre de 10,87 mm, ainsi qu'une activité contre *S. aureus* avec 10,25 mm. Une inhibition plus faible a été observée contre *E. coli*, avec 8,00 mm. Cependant, aucune zone d'inhibition n'a été observée contre *K. pneumoniae*. L'isolat C, provenant du chou-rave, s'est distingué par une forte activité contre *P. aeruginosa* (14,50 mm). Il a également montré une activité contre *S. aureus*, avec une zone d'inhibition de 11,00 mm. Cependant, aucune inhibition n'a été observée contre *K. pneumoniae* ni contre *E. coli.*

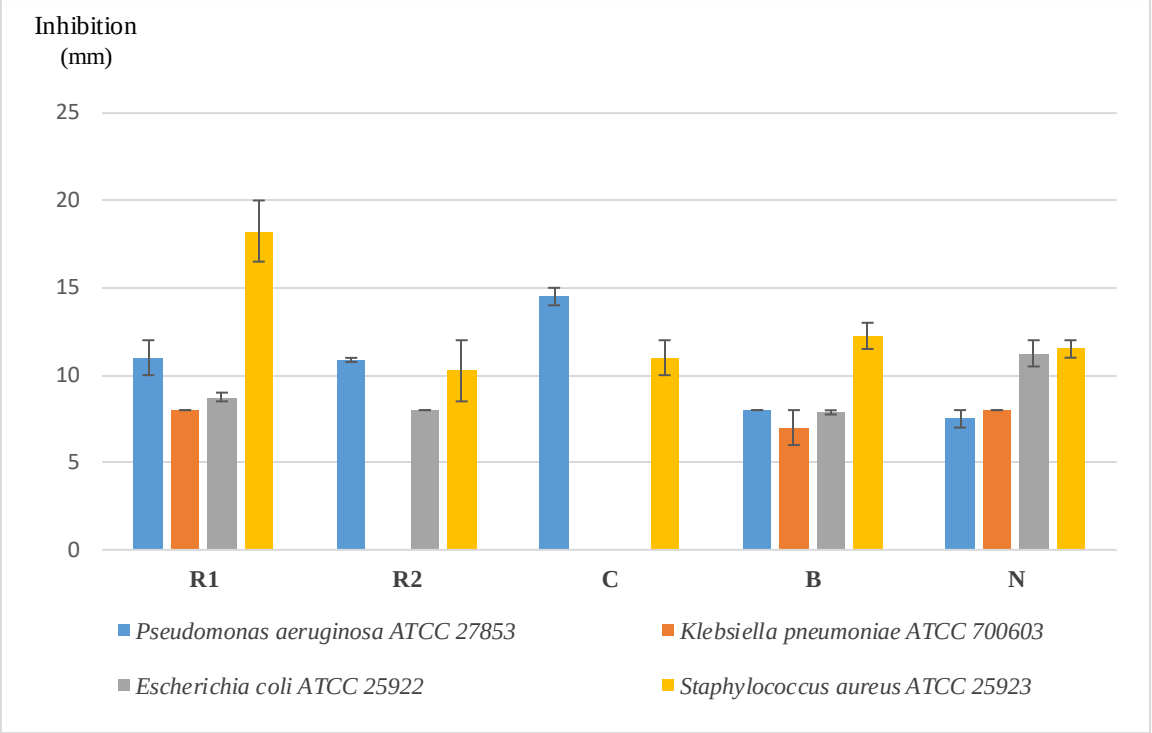


Figure 18. Diamètres des zones d'inhibition des isolats étudiés vis-à-vis des bactéries pathogènes

L'isolat B, issu de la betterave, a montré une activité antibactérienne contre toutes les bactéries pathogènes étudiées, mais avec des diamètres d'inhibition généralement faibles à modérés. La meilleure activité a été observée contre *S. aureus*, avec 12,25 mm. Des inhibitions plus faibles ont été notées contre *P. aeruginosa*, *E. coli* et *K. pneumoniae*, avec respectivement 8,00 mm, 7,87 mm et 7,00 mm.

L'isolat N, provenant du navet, a également montré une activité antibactérienne intéressante. Il a présenté la meilleure inhibition contre *E. coli*, avec un diamètre de 11,25 mm. Il a aussi inhibé *S. aureus* avec 11,50 mm et *K. pneumoniae* avec 8,00 mm. En revanche, son activité contre *P. aeruginosa* était plus faible, avec une zone d'inhibition de 7,50 mm **(Figure 19)**.



Activité antibactérienne des isolats vis-à-vis de ***Staphylococcus aureus***



Activité antibactérienne des isolats vis-à-vis de *Escherichia coli*



Activité antibactérienne des isolats vis-à-vis de *Pseudomonas aeruginosa*



Activité antibactérienne des isolats vis-à-vis de *Klebsiella pneumoniae*

Figure 19. Effet antagoniste des isolats contre les souches pathogènes indicatrices

I.1.6. Évaluation du potentiel starter fromager des isolats sélectionnés

L'évaluation du potentiel starter des isolats R1 et N a été réalisée par comparaison avec un témoin négatif T (−), constitué de lait additionné de présure seule, et un témoin positif T (+), préparé avec un ferment commercial et de la présure.

Tableau 5 : Évaluation technologique des lots fromagers obtenus à partir du lait de chèvre

Lot	**Rendement (%)**	**pH** Final	**Coagulation**	**Cohésion** et h**omogénéité**
T (−)	20,15 ± 0.09	6.46 ± 0.1	+++	++
T (+)	21,85 ± 0.53	4.75 ± 0.16	+++	+++
R1	21,67 ± 1.02	4.74 ± 0.15	+++	+++
N	20,52 ± 0.42	4.95 ± 0.2	+++	++

+ : Faible, ++ : moyen, +++ : fort.

Le pH initial du lait de chèvre après pasteurisation était estimé à 6,71 ± 0,01. Tous les lots ont montré une coagulation forte, indiquant que la formation du caillé a été satisfaisante dans l'ensemble des essais. Cependant, des différences ont été observées au niveau du rendement fromager et du pH final et de l'aspect des caillés.

Aucune différence significative n'a été observée entre les lots pour le rendement fromager ($F = 3,71$; $p = 0,119$), bien que les valeurs moyennes montrent une tendance plus élevée pour T(+) et R1. En revanche, le pH final du lactosérum diffère significativement entre les lots ($F = 56,04$; $p = 0,001$).

Le témoin négatif T (−) a présenté un rendement de 20,15 %, avec un pH final de 6,46. Ce pH élevé montre l'absence d'acidification importante, ce qui est attendu en l'absence de ferment lactique. La coagulation observée dans ce lot est donc principalement liée à l'action enzymatique de la présure et non à une acidification du milieu. Le témoin positif T (+), préparé avec le ferment commercial, a donné le rendement le plus élevé, soit 21,85 %. Son pH final a diminué jusqu'à 4,75 ± 0,16, traduisant une bonne activité acidifiante du ferment utilisé. Ce lot constitue donc la référence technologique pour comparer les isolats testés. Le lot ensemencé avec l'isolat R1 a présenté un rendement de 21,67 %, très proche de celui du témoin positif. De plus, son pH final de 4,74 est pratiquement similaire à celui du ferment commercial. Ces résultats indiquent que l'isolat R1 possède une bonne capacité d'acidification dans le lait de chèvre et permet d'obtenir un rendement fromager comparable à celui du ferment commercial.

Le lot ensemencé avec l'isolat N a présenté un rendement de 20,52 %, légèrement supérieur à celui du témoin négatif mais inférieur à ceux du témoin positif et de R1. Son pH final de 4,95

montre que cet isolat possède également une activité acidifiante, mais moins marquée que celle de R1 et du ferment commercial.

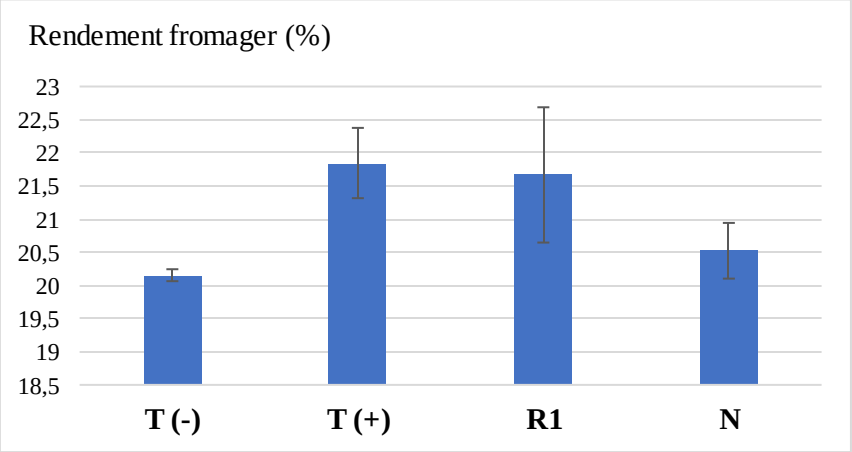


Figure 20. Rendement fromager des différents lots expérimentaux

L'évaluation macroscopique des fromages a montré que les quatre lots présentent une coloration blanche à blanc crème, caractéristique d'un fromage frais à base de lait de chèvre.



T (-) **T (+)** **R1** **N**

Photographie 7. Aspect macroscopique des caillés obtenus après égouttage des différents lots expérimentaux

Le lot T (−), préparé avec lait et présure uniquement, présente un caillé relativement compact, mais son aspect semble moins régulier. Le lot T (+), préparé avec le ferment commercial, montre un caillé relativement bien structuré. Sa texture apparente semble ferme, avec une bonne tenue après égouttage. Le lot R1 présente un aspect visuel satisfaisant. Le caillé apparaît homogène, compact et bien cohésif, avec une surface relativement lisse et une bonne tenue générale comparable à celle du témoin positif. Le lot N présente également un caillé formé, mais son aspect paraît légèrement moins homogène que celui de R1.

II. Discussion

L'isolement réalisé à partir du raïb de lait de chèvre et de légumes lactofermentés a permis d'obtenir cinq isolats retenus comme bactéries lactiques présumées : R1, R2, C, B et N. Leur sélection repose principalement sur la croissance sur milieu MRS, l'aspect colonial, la coloration de Gram positive et la réaction catalase négative. Ces critères sont classiquement utilisés comme première approche d'isolement des bactéries lactiques présumées **(Simatende *et al.*, 2019)**, bien qu'ils ne permettent pas une identification définitive au genre ou à l'espèce. La diversité des sources utilisées explique probablement l'hétérogénéité observée entre les isolats. En effet, les deux matrices, fermentées spontanément selon des procédés traditionnels, constituent des sources favorables à l'isolement de bactéries lactiques.

L'observation microscopique a montré que les isolats présentaient majoritairement une morphologie bacillaire à coccobacillaire, avec des cellules disposées isolément, en paires, en petites chaînettes ou en petits amas. Ce profil morphologique est compatible avec des bactéries lactiques bacillaires, notamment des lactobacilles présumés au sens large, qui sont généralement décrits comme des bacilles ou coccobacilles Gram positifs, non sporulés, pouvant apparaître isolés, en paires ou en chaînettes **(Hammes & Hertel., 2006).** La production de gaz à partir du glucose permet de distinguer deux groupes. Les isolats R1 et C, producteurs de gaz, peuvent être rapprochés de profils hétérofermentaires présumés. Les isolats R2, B et N, non producteurs de gaz, présentent un profil homofermentaire présumé **(Axelsson, 2004).**

Les cinq isolats ont montré une croissance à 4 °C, 30 °C et 37 °C, ce qui traduit une certaine capacité d'adaptation à des températures variées. À 45 °C, seuls certains isolats ont poussé, notamment R1, C et N. Comparés aux isolats d'**El-Awady *et al.* (2011**), obtenus à partir de produits laitiers traditionnels égyptiens, notamment le Laban Rayeb, R1 et R2 présentent des profils physiologiques plus variables. R1 se rapproche de leurs isolats par sa croissance à 45 °C, suggérant une thermotolérance relative, mais s'en distingue par sa croissance à 6,5 % de NaCl et à pH 9,6. R2, en revanche, ne pousse pas à 45 °C, mais sa croissance à pH 4, pH 9,6 et 6,5 % de NaCl traduit une tolérance plus large aux contraintes acides, alcalines et salines.

Dans notre étude, les isolats C, B et N issus des légumes lactofermentés se développent à pH alcalin et en présence de 6,5 % de NaCl, ces résultats rejoignent en partie ceux de **Hanoun *et al.* (2023)**, qui ont travaillé sur des bactéries lactiques isolées d'artichaut, de chou, de chou-fleur et de carotte fermentés. Ces auteurs rapportent que toutes les souches poussaient à 15 °C,

à 45 °C et à pH 9,6, tandis que seules certaines toléraient 6,5 % de NaCl. Cependant, la croissance de nos isolats à 45 °C reste plus variable, et seuls C et N se développent à cette température.

Le pouvoir acidifiant représente l'un des critères les plus importants pour sélectionner des cultures starters **(Ribeiro *et al.*, 2021)**. Tous les isolats ont diminué le pH du lait après 24 h, mais avec des intensités différentes. Les isolats R1 et R2 issus du raïb de lait de chèvre ont montré un pouvoir acidifiant après 24 h, avec des pH finaux de 4,35 ± 0,15 et 4,79 ± 0,19, correspondant respectivement à des ΔpH de 2,23 et 1,81. L'isolat R1 apparaît donc comme le plus acidifiant. Ce résultat est supérieur à celui rapporté par **Sáez *et al.* (2018)** pour une souche isolée de fromage de lait de chèvre de Trancas, dont le pH passait de 6,60 ± 0,01 à 4,71 ± 0,03 après 24 h, avec un ΔpH de 1,89. En revanche, R2 présente un pouvoir acidifiant proche de cette souche, avec un pH final légèrement plus élevé et un ΔpH comparable. Nos résultats sont également cohérents avec ceux de **Premasiri *et al.* (2021)**, qui ont montré que des LAB isolées du lait de chèvre étaient capables de coaguler le lait écrémé avec des pH finaux compris entre 4,8 et 5,9.

Les isolats C, B et N ont montré un bon pouvoir acidifiant dans le lait écrémé après 24 h. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par **Tamang *et al.* (2009)**, qui ont montré que certaines souches lactiques d'origine végétale étaient capables d'abaisser le pH du lait écrémé jusqu'à environ 5. Les auteurs soulignent que, bien que ces souches proviennent de sources végétales et non du lait, elles semblaient adaptées à l'écologie du lait. Le test de Voges-Proskauer indique que les isolats B, N, R1 et R2 produisent de l'acétoïne. Ce résultat suggère une possible orientation du métabolisme vers la formation de composés en C4, tels que l'acétoïne, le diacétyle et le 2,3-butanediol, issus notamment du métabolisme du citrate ou du pyruvate chez certaines bactéries lactiques. Le diacétyle est particulièrement associé aux notes beurrées caractéristiques de certains produits laitiers fermentés **(García-Quintáns *et al.*, 2008).** La production apparente d'exopolysaccharides a été observée chez les isolats B, N et C, avec une intensité plus marquée chez B, tandis que R1 et R2 n'ont pas montré d'aspect mucoïde ou filant dans les conditions testées. Les exopolysaccharides produits par certaines bactéries lactiques jouent un rôle technologique important dans les produits fermentés, car ils peuvent agir comme agents texturants et stabilisants. Ils contribuent notamment à augmenter la viscosité, améliorer la fermeté et l'onctuosité, retenir l'eau dans le réseau protéique et réduire la synérèse, améliorant ainsi la stabilité du produit final **(Duboc & Mollet, 2001).**

L'activité antibactérienne des cinq isolats étudiés varie nettement selon la souche et la bactérie indicatrice. L'isolat R1, issu du raïb de lait de chèvre, apparaît comme le plus actif, car il inhibe les quatre pathogènes testés, avec des diamètres de 8,00 à 18,25 mm. Son activité maximale est observée contre *Staphylococcus aureus* avec 18,25 mm, valeur très proche de celle rapportée par **Hanoun *et al.* (2023)** pour l'isolat 1 issu de légumes fermentés contre *S. aureus* (18,33 ± 0,57 mm), et supérieure à celle obtenue par **Fadare *et al.* (2023)** pour une souche de *Levilactobacillus brevis* contre la même bactérie (16 ± 0,32 mm). Toutefois, elle reste inférieure aux valeurs rapportées par **Szutowska et Gwiazdowska (2021)** pour la souche JS070 (22,5 ± 0,5 mm). Les autres isolats ont aussi inhibé *S. aureus*, mais avec des diamètres plus modérés : 10,25 mm pour R2, 11,00 mm pour C, 12,25 mm pour B et 11,50 mm pour N.

Klebsiella pneumoniae apparaît comme la bactérie la plus résistante dans cette étude. Seuls R1, B et N ont montré une inhibition, avec des diamètres faibles de 8,00 mm, 7,00 mm et 8,00 mm respectivement, tandis que R2 et C n'ont montré aucune activité.

Contre *Pseudomonas aeruginosa*, tous les isolats ont montré une activité, mais avec des intensités variables. L'isolat C, issu du chou-rave, s'est distingué par la meilleure inhibition avec 14,50 mm. Cette valeur est comparable à celle rapportée par **Ali *et al.* (2018)** pour *Lactococcus lactis* YC1 contre *P. aeruginosa* (14 mm), et proche des valeurs observées par **Hanoun *et al.* (20243)** chez les isolats de légumes fermentés, généralement comprises entre 12 et 15 mm. Elle reste cependant inférieure à celle de la souche JS070 rapportée par **Szutowska et Gwiazdowska (2021),** qui a atteint 21,0 ± 0,0 mm contre *P. aeruginosa*.

L'activité contre *E. coli* est globalement faible à modérée. L'isolat N, issu du navet, a présenté la meilleure inhibition avec 11,25 mm, suivi de R1 avec 8,75 mm, R2 avec 8,00 mm et B avec 7,87 mm, tandis que C est resté inactif. La valeur obtenue avec N est proche de celles rapportées par **Gaamouche *et al.* (2014)** pour huit souches d'*Enterococcus faecium* actives contre *E. coli* O157:H7, avec des diamètres compris entre 10,5 ± 0,7 et 13,5 ± 2,1 mm. En revanche, les activités de R1, R2 et B restent inférieures à celles rapportées par **Fadare *et al.* (2023)** pour la souche cbak3 contre *E. coli* (14 ± 0,05 mm), et par **Ali *et al.* (2018)**, où la souche YC1 a montré 25 mm contre *E. coli*.

Il convient de souligner que l'activité antibactérienne observée ne peut être attribuée avec certitude aux bactéries lactiques elles-mêmes. Elle peut également résulter de la production d'acides organiques, de peroxyde d'hydrogène ou d'autres métabolites antimicrobiens. Des

essais complémentaires, notamment la neutralisation du pH, le traitement à la catalase et l'évaluation d'autres facteurs antimicrobiens, sont donc nécessaires pour identifier le ou les mécanismes responsables de cette activité.

L'essai de fabrication de fromage frais a permis de comparer les isolats R1 et N à un témoin présure seule et à un ferment commercial. Le pH initial du lait de chèvre pasteurisé était estimé à 6,71 ± 0,01, ce qui est proche de la valeur rapportée par **Tadjine *et al.*, (2019)** et estimée à 6.67 ± 0.05

Le témoin négatif, préparé sans ferment, correspond principalement à une coagulation enzymatique par la présure ; il est donc attendu qu'il produise un lactosérum plus doux et un pH plus élevé. En revanche, les lots ensemencés subissent une fermentation lactique, au cours de laquelle les bactéries lactiques transforment le lactose en acide lactique, entraînant une baisse du pH et un lactosérum plus acide **(Fox *et al.*, 2016 ; Smith *et al.*, 2016).**

Le témoin positif T (+), préparé avec un ferment commercial, a donné le rendement le plus élevé (21,85 %) avec un pH final de 4,75. L'isolat R1 présente un comportement très proche, avec un rendement de 21,67 % et un pH final de 4,74, ce qui suggère que R1 possède une aptitude technologique comparable au ferment commercial dans les conditions de fabrication testées.

L'isolat N donne un rendement plus et un pH final plus élevé. Malgré son bon pouvoir acidifiant observé. Cela peut s'expliquer par une acidification moins rapide pendant les premières heures ou une adaptation plus faible à la matrice lait de chèvre

Les pH obtenus avec R1 et T(+), autour de 4,7–4,8, restent cohérents avec des fromages frais acidifiés ou acide-présure de lait de chèvre. Ils sont toutefois légèrement plus élevés que ceux rapportés par **Pappa *et al.* (2017)** pour le fromage frais acide caprin Xinotyri, dont le pH est d'environ 4,4. Par ailleurs, les résultats de **Pawlos *et al.* (2023)** confirment que, dans les fromages frais acide-présure de lait de chèvre, les composés calciques peuvent modifier à la fois le pH, le rendement et les propriétés du caillé. Enfin, les résultats de **Tadjine *et al.* (2019)** appuient l'idée que le lait de chèvre peut donner des rendements fromagers élevés, notamment après traitement thermique, ce qui rend les rendements obtenus dans notre essai, proches de 20–22 %, technologiquement plausibles.

Conclusion

Conclusion générale

Les produits fermentés d'origine laitière et végétale constituent une source intéressante de microorganismes présentant un potentiel technologique. Dans ce travail, les échantillons de raïb de lait de chèvre, de chou-rave, de betterave et de navets lactofermentés ont permis d'obtenir plusieurs isolats présentant des caractères compatibles avec les bactéries lactiques présumées. Les isolats étudiés ont montré une diversité morphologique, physiologique et technologique, ce qui traduit l'hétérogénéité des bactéries issues de produits fermentés traditionnels et confirme l'intérêt de ces matrices comme réservoirs potentiels de microorganismes d'intérêt technologique.

L'étude du pouvoir acidifiant a montré que les isolats possèdent des capacités d'acidification variables. Les isolats N et R1 se sont distingués par les baisses de pH les plus importantes après 24 h d'incubation. Les tests complémentaires ont également mis en évidence des caractères utiles, notamment la production d'acétoïne chez certains isolats, la production apparente d'exopolysaccharides et une activité antibactérienne variable vis-à-vis de bactéries pathogènes indicatrices. L'évaluation du potentiel starter en fabrication de fromage frais de lait de chèvre a montré que l'isolat R1 présente le profil le plus prometteur avec un comportement proche du ferment commercial.

En conclusion, cette étude a permis de sélectionner des bactéries lactiques présumées présentant des propriétés technologiques intéressantes. Cependant, l'identification des isolats reste présomptive ; des analyses biochimiques plus poussées ou moléculaires, ainsi qu'une évaluation de l'innocuité, sont nécessaires avant toute proposition d'utilisation réelle comme culture starter alimentaire.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

1. Abbas, H. M., Hassan, F. A. M., Abd El-Gawad, M. A. M., & Enab, A. K. (2014). Physicochemical characteristics of goat's milk. Life Science Journal, 11(1s), 307-317.
2. Abbasiliasi, S., Tan, J. S., Ibrahim, T. A. T., Bashokouh, F., Ramakrishnan, N. R., Mustafa, S., & Ariff, A. B. (2017). Fermentation factors influencing the production of bacteriocins by lactic acid bacteria: A review. RSC Advances, 7, 29395.
3. Adamu, B. B., Obioh, G. I. B., Ideh, R. R., & Olukotun, G. B. (2025). The role of lactic acid bacteria in food, agriculture and industry: A review. GSC Biological and Pharmaceutical Sciences, 30(1) ; 99–106.
4. Aguirre, M., & Collins, M. D. (1993). Lactic acid bacteria and human clinical infection. Journal of Applied Bacteriology, 75 ; 95–107.
5. Akabanda, F., Owusu-Kwarteng, J., Tano-Debrah, K., Glover, R. L. K., & Nielsen, D. S. (2014). The use of lactic acid bacteria starter culture in the production of Nunu, a spontaneously fermented milk product in Ghana. International Journal of Food Science, 2014, 721067.
6. Ali, M. S., Ahmed, S., Uddin, M. F., Matin, A., Uddin, M. S., & Yeasmin, N. (2018). Characterization of probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from yoghurt available in Bangladesh. Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology, 6(11), 1544–1549.
7. AlKaisy, Q. H., Al-Saadi, J. S., Al-Rikabi, A. K. J., Altemimi, A. B., Hesarinejad, M. A., & Abdelmaksoud, T. G. (2023). Exploring the health benefits and functional properties of goat milk proteins. Food Science & Nutrition, 11(10), 5641-5656.
8. Arbulu, S., & Kjos, M. (2024). Revisiting the multifaceted roles of bacteriocins. Microbial Ecology ; 87:41.
9. Avci, D., Gillarová, S., Henke, S., Bubník, Z., & Sluková, M. (2025). Probiotic lactic acid bacteria in biotechnology and the food industry: A review. *Czech Journal of Food Sciences, 43*(2), 75–89.
10. Avril, D., & Denis, M. (1992). Biopreservation by lactic acid bacteria. Antonie van Leeuwenhoek, 70, 331–345.

11. Axelsson L. Lactic acid bacteria: classification and physiology. In: Salminen S, von Wright A, Ouwehand A, editors. Lactic Acid Bacteria: Microbiological and Functional Aspects. 3rd ed. New York: Marcel Dekker; 2004.

12. Ayivi, R. D., Gyawali, R., Krastanov, A., Aljaloud, S. O., Worku, M., Tahergorabi, R., Silva, R. C. d., & Ibrahim, S. A. (2020). Lactic acid bacteria: Food safety and human health applications. *Dairy, 1*(3), 202–232. https://doi.org/10.3390/dairy1030015

13. Badis, A., Guetarni, D., Moussa-Boudjemaa, B., Henni, D. E., & Kihal, M. (2004). Identification and technological properties of lactic acid bacteria isolated from raw goat milk of four Algerian races. Food Microbiology, 21(5), 579-588.

14. Bahrami, S., Andishmand, H., Pilevar, Z., Hashempour-baltork, F., Torbati, M., Dadgarnejad, M., Rastegar, H., Mohammadi, S. A., & Azadmard-Damirchi, S. (2024). Innovative perspectives on bacteriocins: Advances in classification, synthesis, mode of action, and food industry applications. Journal of Applied Microbiology, 135(11), lxae274

15. Balmaseda, A., Lorentzen, M., Duthil, L., Miot-Sertier, C., Claisse, O., Nielsen, T. K., Hansen, L., & Lucas, P. (2026). Comparative genomics and phenotypes of Oenococcus alcoholitolerans and Oenococcus oeni, two sister species adapted to ethanol-rich environments. Food Microbiology, 133, 104886.

16. Bendimerad, N., Kihal, M., & Berthier, F. (2012). Isolation, identification, and technological characterization of wild leuconostocs and lactococci for traditional Raib type milk fermentation. Dairy Science & Technology, 92, 249–264.

17. Biadała, A., & Konieczny, P. (2018). Goat's milk-derived bioactive components: A review. Mljekarstvo, 68(4), 239-253.

18. Bintsis, T. (2018). Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics. AIMS Microbiology, 4(4) ; 665–684.

19. Boumediene, F., Meribai, A., Kahlouche, A., Bouchibane, M., Touzout, N., & Belbraouet, S. (2025). Effects of breed and lactation-stage of goat on the composition and lipid fraction of milk in Algeria. Asian Journal of Dairy and Food Research, 44(3), 505-510.

20. Bousmaha-Marroki, L., Marroki, A., & Kihal, M. (2014). Antibiotic susceptibility and heterogeneity in technological traits of lactobacilli from goat's milk of Algeria. Brazilian Journal of Microbiology, 45(2), 383-389.

21. Carré-Mlouka, A. (2018). Bactéries lactiques et métabolismes fermentaires. Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), DIREF

22. Cavanagh, D., Fitzgerald, G. F., & McAuliffe, O. (2015). From field to fermentation: the origins of Lactococcus lactis and its domestication to the dairy environment. Food Microbiology, 47, 45–61.

23. Clark, S., & Mora García, M. B. (2017). A 100-year review: Advances in goat milk research. Journal of Dairy Science, 100(12), 10026-10044.

24. Contessa, C. R., da Rosa, J. V., de Ávila, M. T., da Rosa, G. S., Moraes, C. C., & Burkert, J. F. d. M. (2025). Chemical and biotechnological processes employed as emerging technologies for the production and stability of bacteriocins. Processes, 13,44.

25. Dalmasso, M., Aubert, J., Briard-Bion, V., Chuat, V., Deutsch, S.-M., Even, S., et al. (2012). A temporal -omic study of Propionibacterium freudenreichii CIRM-BIA1T adaptation strategies in conditions mimicking cheese ripening in the cold. PLoS ONE, 7(1), e29083. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029083

26. Darbandi, A., Asadi, A., Mahdizade Ari, M., Ohadi, E., Talebi, M., Halaj Zadeh, M., et al. (2022). Bacteriocins: Properties and potential use as antimicrobials. Journal of Clinical Laboratory Analysis, 36(1), e 24093; 1-40.

27. Daw, M. A., & Falkiner, F. R. (1996). Bacteriocins: Nature, function and structure. Micron, 27(6) ; 467–479.

28. Di Cagno, R., Coda, R., De Angelis, M., & Gobbetti, M. (2013). Exploitation of vegetables and fruits through lactic acid fermentation. Food Microbiology, 33(1), 1–10.

29. Dimidi, E., Cox, S. R., Rossi, M., & Whelan, K. (2019). Fermented foods: Definitions and characteristics, impact on the gut microbiota and effects on gastrointestinal health and disease. Nutrients, 11, 1806.

30. Dortu, C., & Thonart, P. (2009). Les bactériocines des bactéries lactiques : caractéristiques et intérêts pour la bioconservation des produits alimentaires. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 13(1), 143–154.

31. Duboc, P., & Mollet, B. (2001). Applications of exopolysaccharides in the dairy industry. International Dairy Journal, 11(9), 759–768.
32. El-Awady, A. A., Zien El-Din, M. M., & El-Sharoud, W. M. (2011). Isolation of exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria from traditional Egyptian dairy products. Journal of Food and Dairy Sciences.
33. Enan G, Mamdouh M, Negm S, Ismail AA, Abdel-Shafi S. Classification, antimicrobial potential, industrial applications and probiotic capability of lactic acid bacteria: A review article. Res J Appl Sci. 2018;13(12) ; 742–757.
34. Fadare, O. S., Anyadike, C. H., Momoh, A. O., & Bello, T. K. (2023). Antimicrobial properties, safety, and probiotic attributes of lactic acid bacteria isolated from sauerkraut. African Journal of Clinical and Experimental Microbiology, 24(1), 61–72.
35. Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. H. (2016). Fundamentals of Cheese Science. Springer.
36. Fu, J., Wang, L., Sun, J., Ju, N., & Jin, G. (2022). Malolactic fermentation: new approaches to old problems. Microorganisms, 10(12), 2363. https://doi.org/10.3390/microorganisms10122363
37. Gaamouche, S., Arakrak, A., Bakkali, M., & Laglaoui, A. (2014). Antimicrobial activity of lactic acid bacteria and bacteriocins isolated from traditional brine table olives against pathogenic bacteria. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 3(11), 657–666.
38. García-Quintáns, N., Blancato, V. S., Repizo, G. D., Magni, C., & López, P. (2008). Citrate metabolism and aroma compound production in lactic acid bacteria.
39. Hammes, W. P., & Hertel, C. (2006). The genera Lactobacillus and Carnobacterium. In M. Dworkin et al. (Eds.), The Prokaryotes, 3rd ed. Springer.
40. Hanoun, S., Hamel, F., Bouteraa, K., Djagrouri, F., Ahmed Gaid, K., Mellal, H., Chenna, H., & Aroua, K. (2023). Screening of antibacterial activity of lactic acid bacteria isolated from fermented vegetables against foodborne pathogenic bacteria and investigation of their potential production of bacteriocins. International Journal of Agricultural Technology, 20(3), 1037–1048.
41. Hayek, S. A; Ibrahim, S. A. (2013). Current limitations and challenges with lactic acid bacteria: A review. Food and Nutrition Sciences, 4 ; 76-79.

42. Ibrahim, S. A., Ayivi, R. D., Zimmerman, T., Siddiqui, S. A., Altemimi, A. B., Fidan, H., Esatbeyoglu, T., & Bakhshayesh, R. V. (2021). Lactic acid bacteria as antimicrobial agents: Food safety and microbial food spoilage prevention. Foods, 10(12), 3131. https://doi.org/10.3390/foods10123131

43. Jaffar, N. S., Jawan, R; Chong, K. P. (2023). The potential of lactic acid bacteria in mediating the control of plant diseases and plant growth stimulation in crop production: A mini review. Frontiers in Plant Science, 14, 1074945; 2-3.

44. Jenness, R. (1980). Composition and characteristics of goat milk: Review 1968-1979. Journal of Dairy Science, 63(10), 1605-1630.

45. Jin, Y. (2024). The role and future prospects of microorganisms in fermented food production. Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences, 4.

46. Kagambèga, B., Cissé, H., Tapsoba, F., Sawadogo, A., Zongo, C., Traoré, Y., & Savadogo, A. (2019). Bouillies fermentées traditionnelles à base de céréales au Burkina Faso : diversité, technologies de production et microorganismes à potentiel probiotique associés. Revue des Sciences et Technologies, Synthèse, 25(2) ; 12–24.

47. Khalid, K. (2011). An overview of lactic acid bacteria. International Journal of Biosciences, 1(3); 3-4

48. Kilic, T. (2024). Therapeutic properties of lactic acid bacteria. Open Access Journal of Microbiology & Biotechnology, 9(2).

49. Kunji, E. R. S., Mierau, I., Hagting, A., Poolman, B., & Konings, W. N. (1996). The proteolytic systems of lactic acid bacteria. Antonie van Leeuwenhoek, 70, 187–221.

50. MacFaddin, J. F. (2000). Biochemical Tests for Identification of Medical Bacteria, 3rd ed. Lippincott Williams & Wilkins.

51. Marco, M. L., Sanders, M. E., Gänzle, M., Arrieta, M.-C., Cotter, P. D., De Vuyst, L., et al. (2021). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on fermented foods. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 18, 196–208. https://doi.org/10.1038/s41575-020-00390-5

52. Marroki, A., Zúñiga, M., Kihal, M., & Pérez-Martínez, G. (2011). Characterization of Lactobacillus from Algerian goat's milk based on phenotypic, 16S rDNA sequencing and their technological properties. Brazilian Journal of Microbiology, 42(1), 158-171.

53. Masood, M. I., Qadir, M. I., Shirazi, J. H., & Khan, I. U. (2011). Beneficial effects of lactic acid bacteria on human beings. Critical Reviews in Microbiology, 37(1); 91–98.

54. Matoulková D, Kubizniaková P. Mikrobiologie pivovarské výroby – Bakterie mléčného kvašení a kultivační metody pro jejich detekci – I. část / Microbiology of brewing – Lactic acid bacteria and cultivation methods of their detection – Part I. Kvasny Prum. 2015;61(3); 76–88.

55. Milliere, J. B., Mathot, A. G., Schmitt, P., & Divie, C. (1989). Phenotypic characterization of Leuconostoc species. Journal of Applied Bacteriology, 67, 529–542.

56. Mohsin, A. Z., Sukor, R., Selamat, J., Meor Hussin, A. S., & Ismail, I. H. (2019). Chemical and mineral composition of raw goat milk as affected by breed varieties available in Malaysia. International Journal of Food Properties, 22(1), 815-824.

57. Nalwade, M. M., Gaikwad, T. N., Shinde, R. S., Nezkar, S. R., & Owal, S. P. (2021). Bacteriocin production and its application in food and pharmaceuticals. International Journal of Environmental & Agriculture Research, 7(8); 8-12

58. O'Callaghan, A., & van Sinderen, D. (2016). Bifidobacteria and their role as members of the human gut microbiota. Frontiers in Microbiology, 7, 925.

59. Ogrodowczyk, A. M., & Drabińska, N. (2021). Crossroad of tradition and innovation – the application of lactic acid fermentation to increase the nutritional and health-promoting potential of plant-based food products – a review. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 71(2), 107–134. https://doi.org/10.31883/pjfns/134282

60. Pappa, E. C., Bontinis, T. G., Tasioula-Margari, M., & Samelis, J. (2017). Microbial quality of and biochemical changes in fresh soft, acid-curd Xinotyri cheese made from raw or pasteurized goat's milk. Food Technology and Biotechnology, 55(4), 496–510.

61. Pappa, E. C., Kondyli, E., Bosnea, L., Malamou, E., & Vlachou, A. M. (2022). Chemical, microbiological, sensory, and rheological properties of fresh goat milk cheese made by different starter cultures during storage. Journal of Food Process Engineering.

62. Parada, J. L., Caron, C. R., Medeiros, A. B. P., & Soccol, C. R. (2007). Bacteriocins from lactic acid bacteria: Purification, properties and use as biopreservatives. Brazilian Archives of Biology and Technology, 50(3), 521–542.

63. Park, Y. W., Haenlein, G. F. W., & Wendorff, W. L. (Eds.). (2017). Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

64. Paszczyk, B., Czarnowska-Kujawska, M., Klepacka, J., & Tońska, E. (2023). Health-promoting ingredients in goat's milk and fermented goat's milk drinks. Animals, 13(5), 907.

65. Pawlos, M., Znamirowska-Piotrowska, A., Kowalczyk, M., Zaguła, G., & Szajnar, K. (2023). Possibility of using different calcium compounds for the manufacture of fresh acid rennet cheese from goat's milk. Foods, 12(19), 3703.

66. Perin, L. M., Miranda, R. O., Todorov, S. D., Franco, B. D. G. M., & Nero, L. A. (2014). Antagonistic lactic acid bacteria isolated from goat milk and identification of a novel nisin variant Lactococcus lactis. BMC Microbiology, 14, 36.

67. Premasiri, D. L. D. A. S., Rajawardana, D. U., Muddannayake, D. C., & Hewajulige, I. G. N. (2021). Isolation, characterization and identification of industrially beneficial probiotic lactic acid bacteria from goat milk. Journal of Agricultural Sciences – Sri Lanka, 16(2).

68. Qiu, X., Zhang, Y., & Hong, H. (2021). Classification of acetic acid bacteria and their acid resistant mechanism. AMB Express, 11, 29. https://doi.org/10.1186/s13568-021-01189-6

69. Rai, D. C., Rathaur, A., Yadav, A. K., & Shraddha. (2022). Nutritional and nutraceutical properties of goat milk for human health: A review. Indian Journal of Dairy Science, 75(1), 1-10.

70. Raimbault, M. (1995). Importance des bactéries lactiques dans les fermentations du manioc. In T. Agbor Egbe, A. Brauman, D. Griffon, & S. Trèche (Eds.), Transformation alimentaire du manioc. Paris: ORSTOM, 259–275.

71. Ribeiro, S. C., Coelho, M. C., & Silva, C. C. G. (2021). A rapid screening method to evaluate acidifying activity by lactic acid bacteria. Journal of Microbiological Methods, 186, 106261.

72. Roland, N., Spatz, M., Le-Loir, Y., Steyer, J.-P., Schbath, S., Beney, L., Jeantet, R., Lindley, N., Champomier-Vergès, M.-C., & Paineau, D. (2025). Bénéfices des aliments fermentés, de l'empirisme aux démonstrations scientifiques : l'apport de Ferments du

Futur / Benefits of fermented foods, from empiricism to scientific evidence: The contribution of Ferments du Futur. Cahiers de Nutrition et de Diététique.

73. Román-Camacho, J. J., Santos-Dueñas, I. M., García-García, I., Moreno-García, J., & García-Martínez, T. (2023). Latest trends in industrial vinegar production and the role of acetic acid bacteria: classification, metabolism, and applications — a comprehensive review. Foods, 12(19), 3705. https://doi.org/10.3390/foods12193705

74. Sáez, G. D., Flomenbaum, L., & Zárate, G. (2018). Lactic acid bacteria from Argentinean fermented foods: Isolation and characterization for their potential use as starters for fermentation of vegetables. Food Technology and Biotechnology, 56(3), 398–410.

75. Şanlıbaba, P., & Güçer, Y. (2015). Antimicrobial activity of lactic acid bacteria. Agriculture & Food ; 3.

76. Sarwar, A., Aziz, T., Din, J., Khalid, A., Rahman, T., & Daudzai, Z. (2018). Pros of lactic acid bacteria in microbiology: A review. Biomedical Letters, 4(2); 59–66.

77. Sharma, A., Lee, S., & Park, Y.-S. (2020). Molecular typing tools for identifying and characterizing lactic acid bacteria: A review. Food Science and Biotechnology, 29(10) ; 1301–1318.

78. Sharma, K., Kaur, S., Singh, R., & Kumar, N. (2021). Classification and mechanism of bacteriocin induced cell death: A review. Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 11(3), e3733.

79. Siddiqui, S. A., Erol, Z., Rugji, J., Taşçı, F., Kahraman, H. A., Toppi, V., Musa, L., Di Giacinto, G., Bahmid, N. A., Mehdizadeh, M., & Castro-Muñoz, R. (2023). An overview of fermentation in the food industry – looking back from a new perspective. Bioresources and Bioprocessing, 10 ; 85.

80. Simatende, P., Siwela, M., Gadaga, T. H., & Nkambule, S. J. (2019). Identification of lactic acid bacteria and determination of selected biochemical properties in emasi and emahewu. South African Journal of Science, 115(11/12).

81. Singh, A., & Kumar, S. (2025). Exploring the functionality of microbes in fermented foods: technological advancements and future directions. Fermentation, 11(6), 300. https://doi.org/10.3390/fermentation11060300

82. Singh, P., Arya, N., Sharma, S., Sharma, A., Rasane, P., Gaur, S. S., Kaur, S., Gunjal, M., Kılıçgün, H., & Singh, J. (2025). A comprehensive review of fermentation technologies in food processing: From traditional to cutting edge. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 49, 448–467.

83. Sionek, B., Szydłowska, A., Küçükgöz, K., & Kołożyn-Krajewska, D. (2023). Traditional and new microorganisms in lactic acid fermentation of food. Fermentation, 9(12), 1019. https://doi.org/10.3390/fermentation9121019

84. Sionek, B., Szydłowska, A., Trząskowska, M., & Kołożyn-Krajewska, D. (2024). The impact of physicochemical conditions on lactic acid bacteria survival in food products. Fermentation, 10 ; 298.

85. Smith, S., Smith, T. J., & Drake, M. A. (2016). Flavor and flavor stability of cheese, rennet, and acid wheys. Journal of Dairy Science, 99(5), 3434–3444.

86. Stiles ME, Holzapfel WH. Lactic acid bacteria of foods and their current taxonomy. International Journal of Food Microbiology. 1997;36(1):1–29.

87. Surati, S. (2020). Bacteriocin, antimicrobial as a new natural food preservative: Its potential and challenges. ERUDITIO, 1(1) ; 63–82.

88. Swain, M. R., Anandharaj, M., Ray, R. C., & Parveen Rani, R. (2014). Fermented fruits and vegetables of Asia: A potential source of probiotics. Biotechnology Research International, 2014, 250424.

89. Szutowska, J., & Gwiazdowska, D. (2021). Probiotic potential of lactic acid bacteria obtained from fermented curly kale juice. Archives of Microbiology, 203, 975–988.

90. Taale, E., Savadogo, A., Zongo, C., Tapsoba, F., Karou, S. D., & Traoré, A. S. (2016). Les peptides antimicrobiens d'origine microbienne : cas des bactériocines. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 10(1) ; 384–399.

91. Tadjine, D., Boudalia, S., Bousbia, A., Khelifa, R., Mebirouk-Boudechiche, L., Tadjine, A., & Chemmam, M. (2020). Pasteurization effects on yield and physicochemical parameters of cheese in cow and goat milk. Food Science and Technology, 40, 580–587.

92. Tamang, J. P., Tamang, B., Schillinger, U., Guigas, C., & Holzapfel, W. H. (2009). Functional properties of lactic acid bacteria isolated from ethnic fermented vegetables of the Himalayas. International Journal of Food Microbiology, 135(1), 28–33.

93. Thakur, R., Biswal, P., Sari, T. P., Kumar, D., Sagar, N. A., Bhardwaj, S., Pandey, H. O., Chandratre, G. A., & Tarafdar, A. (2024). Therapeutic effect of goat milk and its value-addition: Current status and way forward. Journal of Food Science and Technology, 61(9), 1621-1631.

94. Vasudevan, R., Sowmya, K., Haripriya, D., Akshitha, K., Sai Keerthi, R., & Bhoomika, T. (2025). Microbial fermentation: A novel attempt of enhancing food quality. Journal of Microbiology & Experimentation,13(2).

95. Voidarou, C., Antoniadou, M., Rozos, G., Tzora, A., Skoufos, I., Varzakas, T., Lagiou, A., & Bezirtzoglou, E. (2021). Fermentative foods: Microbiology, biochemistry, potential human health benefits and public health issues. Foods, 10, 69.

96. Xu, J., Wang, Z., Shi, Z., Liu, M., Fan, X., Zhang, T., Wu, Z., Zhu, M., Tu, M., & Pan, D. (2025). Detection and development of lactic acid bacteria bacteriocins: A hint on the screening of bacteriocins of lactic acid bacteria. LWT – Food Science and Technology, 222, 117627.

97. Yadava, M. K., & Tiwari, S. K. (2023). Methods for determination of antimicrobial activity of bacteriocins of lactic acid bacteria. Microbiology, 92(6), 745–765.

98. Zheng J, Wittouck S, Salvetti E, Franz CMAP, Harris HMB, Mattarelli P, et al. A taxonomic note on the genus Lactobacillus: description of 23 novel genera, emended description of the genus Lactobacillus Beijerinck 1901, and union of Lactobacillaceae and *Leuconostocaceae*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2020;70:2782–2858.

99. Zhou, Y., Cai, A., Mo, Z., Diao, N., Huang, J., Long, B., Shang, S., Hu, W., Feng, K., & Sarengaowa. (2026). A review of dominant lactic acid bacteria strains and inoculation fermentation for fermented mustard plant. Frontiers in Microbiology, 17, 1799812.

Annexes

A. Milieux de culture

Muller Hinton (Muller Hinton, 1941)

Pour 1 litre de milieu :

Hydrolysat acide de caséine	17,5g
Infusion de viande	2,0g
Amidon soluble	1,5g
Agar –agar bactériologique	17g

pH=7,3 ± 0,2.

Stérilisation à 105°C pdt 20min.

Milieu MRS (de Man, Rogossa & Sharpe ,1960)

Polypeptone	10,00g
Extrait de viande	10,00g
Extrait autolytique de levure	5,00g
Glucose (C6H12O6)	20,00g
Tween 80 (Sorbitane monoléate)	1,08g
Phosphat dipotassique	2,00g
Acétate de sodium	5,00g
Citrate d'ammonium	2,00g
Sulfate de magnésium	0,20g
Sulfate de manganése	0,05g
Agar agar bactériologique	15,00g
Eau distillée	1000ml
pH	6,5

Milieu Clark et Lubs

Eau distillée	100ml
Peptone	0,7g
Glucose	0,5g
K2HPO4	0,5g

Milieu Bouillon Nutritif

Extrait de viande	1g
Extrait de levure	2g
Peptone	5g
Chlorure de sodium	5g
Eau distillée q.s.p	1L
pH =	7

B. Réactifs et Colorants

- Colorants de la coloration de Gram :
  - Solution de violet de gentiane : 1 g de violet de gentiane, 10 ml d'alcool éthylique à 95 %, 2 g de phénol, complétés à 100 ml avec de l'eau distillée.
  - Solution de Lugol : 1 g d'iodure de potassium, 1 g d'iode, complétés à 300 ml avec de l'eau distillée.
  - Alcool éthylique : alcool éthylique à 95 %.
  - Solution de fuchsine de Ziehl : 1 g de fuchsine, 10 ml d'alcool éthylique à 95 %, 5 g de phénol, complétés à 100 ml avec de l'eau distillée.
- Phénolphtaléine.
- Réactifs de Voges-Proskauer : VP I et VP II.