

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULoud MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DEPARTEMENT DES SCIENCES ALIMENTAIRES



Mémoire de fin d'étude

**En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en sciences
alimentaires**

Spécialité : Agroalimentaire et Contrôle de Qualité

THÈME

**Etude de faisabilité de la fermentation lactique
spontanée des choux pommés (*Brassica
oleracea var. capitata*) à température ambiante:
Préparation d'une choucroute**

Réalisé par :

M^{lle} HEBIB Sirem

Devant le jury composé de:

M^{me} BENAHMED DJILALI Adiba	Professeur	UMMTO	Présidente
M^{me} BOUKANDOUL Silia	MC/A	UMMTO	Examinatrice
M^{me} ALLANE Taous	MC/B	UMMTO	Promotrice

Promotion 2024/2025

Remerciements

Je remercie Dieu tout-puissant de m'avoir accordé la santé, la force et la détermination nécessaires pour entreprendre et mener à bien ce mémoire. C'est grâce à Sa guidance et Sa bénédiction que j'ai pu surmonter les défis rencontrés tout au long de ce parcours.

C'est avec une profonde gratitude que je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Madame ALLANE Taous , mon encadrante, pour son accompagnement précieux et constant durant l'élaboration de ce travail. Son expertise, sa patience et ses conseils ont été d'une importance inestimable. Elle a su m'orienter avec rigueur et bienveillance, me permettant ainsi de donner le meilleur de moi-même dans ce projet.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble de mes professeurs pour leur enseignement, leur générosité et la grande patience dont ils ont fait preuve tout au long de mon cursus.

Je tiens également à remercier mes camarades et amis pour leur soutien moral et leur présence bienveillante lors des moments de doute et de fatigue. Leurs encouragements et leur amitié ont été un véritable réconfort tout au long de cette aventure.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à ma famille, qui a toujours cru en moi et m'a soutenue sans relâche. Je remercie tout particulièrement mon père pour ses conseils , m'a mère pour son aide et sa présence constante , mon frère pour son soutien . Leur amour, leur compréhension et leurs sacrifices ont été une source inépuisable de motivation. Ce mémoire est aussi le fruit de leur soutien indéfectible.

À toutes ces personnes, je dédie ce travail, avec mes remerciements les plus sincères.





Dédicaces

*Je tiens à remercier ALLAH de m'avoir accordé la santé,
la force et la volonté d'accomplir ce travail.*

*C'est avec une profonde gratitude et des mots sincères que je dédie ce mémoire à toutes les
personnes qui me sont chères.*

*À ma mère , cette femme exceptionnelle que Dieu garde pour tous ses sacrifices, son amour
inconditionnel, son soutien indéfectible et ses prières constantes. Tu as été mon pilier, ma source
de courage et d'inspiration tout au long de ce parcours. Aucune dédicace ne saurait traduire
l'amour immense que je te porte ni exprimer toute ma reconnaissance pour tout ce que tu
représentes pour moi. Que Dieu te préserve, te comble de bonheur, de santé et te donne une
longue vie.*

*À mes chers amis , pour leur fidélité et leurs encouragements dans les moments de joie comme
dans les moments de doute. Vous êtes une partie essentielle de ma vie, et je vous souhaite tout le
bonheur du monde. Je vous aime profondément.*

*À l'ensemble de la promotion du Master Agroalimentaire et Contrôle de Qualité , pour ces
années partagées, riches en apprentissage et en souvenirs. Ce mémoire est aussi un témoignage de
notre parcours commun.*

*À tous ceux qui m'aiment , pour leur présence bienveillante et leur soutien moral. Votre amour
et vos encouragements ont été une force motrice dans la réalisation de ce projet.*

Avec toute ma reconnaissance,



Sirem.

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Listes des abréviations et symboles	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale.....	1

Partie I : Synthèse bibliographique

CHAPITRE I : Généralités sur la fermentation

I.1	Définition.....	3
I.2	Types de Fermentation	3
I.3	L'acide lactique	5
I.4	Voies de la fermentation lactique.....	6
I.5	Bienfait des légumes lactofermenté	8

CHAPITRE II : Les Bactéries lactiques

II.1	Généralité sur les bactéries lactiques.....	9
II.2	Origine et habitat des bactéries lactiques	9
II.3	Caractéristiques des bactéries lactiques	9
II.4	Classification des bactéries lactiques.....	10
II.5	Propriétés antimicrobienne des bactéries lactiques	13
II.6	Caractères technologiques des bactéries lactiques	13

CHAPITRE III : Chou et choucroute

III.1.1	Le chou	15
III.1.2	Variété de chou	15
III.1.3	Composition biochimique du chou	16
III.1.4	Intérêt nutritionnel et diététique du chou	19
III.1.5	Mode d'utilisation des choux	19
III.2.1	Historique de la choucroute.....	24
III.2.2	Généralités sur la choucroute	25
III.2.3	Préparation traditionnelle des choucroutes	26
III.2.4	Fermentation de la choucroute	26

III.2.5	Intérêt nutritionnel et diététique de la choucroute	27
III.2.6	Conservation des choucroutes	27
III.2.7	Processus industrielle de la fabrication des choucroute	28

Partie II : Etude expérimentale

CHAPITRE I : Matériel et méthodes

I.	Mini enquête d'opinion sur la consommation de la choucroute.....	25
II.	Matériel végétale (Chou)	25
III.	Préparation de la choucroute.....	26
IV.	Etude des caractéristiques physicochimiques.....	28
V.	Analyses chimiques complémentaires.....	32
VI.	Etude statistique.....	34
VII.	Analyses microbiologiques.....	37
VIII.	Evaluation sensorielle.....	40

CHAPITRE II : Résultats et discussion

I.	Mini enquête d'opinion sur la consommation de la choucroute.....	41
II.	Suivi des conditions expérimentales.....	42
III.	Caractérisation physico-chimique.....	44
IV.	Analyse de l'acide lactique par CCM.....	51
V.	Analyses chimique complémentaires.....	53
VI.	Analyses microbiologiques.....	57
VII.	Analyse sensorielle de la choucroute.....	62

Conclusion	63
-------------------------	-----------

Perspectives	64
---------------------------	-----------

Références bibliographiques

Annexes

Résumé

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
BL	Bactéries Lactique
ATP	Adénosine Triphosphate
ADN	Acide Désoxyribonucléique
ARN	Acide Ribonucléique
AQR	Apport Quotidien Recommandé
Lc	<i>L. mesenteroides</i>
TPT	Teneur en Polyphénols Totaux
Spp.	Espèces (<i>species</i>)
EAG	Équivalent Acide Gallique
CCM	Chromatographie sur Couche Mince
Ds	Distance du spot
Rf	Rapport frontal
EPS	Exopolysaccharides
PR	Pouvoir Réducteur

Liste des tableaux

Tableau I : Types de fermentation et microorganismes impliquées	4
Tableau II : Différents genres de bactéries lactiques	12
Tableau III : Variétés de chou : caractéristiques et longueurs	16
Tableau IV : Valeurs nutritionnelles de la choucroute pour 100g	21
Tableau V : Préparation des dilutions de l'acide gallique pour la réalisation de la courbe d'étalonnage.....	33
Tableau VI : Caractéristiques physico-chimiques du chou frais (Cf) et de la choucroute obtenue aux 18 ^e et 21 ^e jours de fermentation.....	51
Tableau VII : Analyses de l'acide lactique par CCM.....	52
Tableau VIII : Analyses microbiologiques effectuées sur le produit fini	58
Tableau IX : Étude macroscopique des bactéries lactiques	59
Tableau X : Test de catalase réalisé sur <i>Lactobacillus et Streptococcus</i>	61

Liste des figures

Figure 1 : Structure tridimensionnelle de l'acide lactique	5
Figure 2 : Isomeres optiquement actifs de l'acide lactique	6
Figure 3 : Voies d'assimilation du carbone des bacteries lactiques a partir de differents sucres presents dans les sources renouvelables	7
Figure 4 : Arbre phylogenetique des principaux genres de bacteries lactiques et des genres associes, obtenu par analyse des arnr 16s.....	11
Figure 5 : Photographie de la variete de chou utilisee	25
Figure 6 : Photographie du mélange des lanières de chou avec le sel	27
Figure 7 : Photographie de la mise en bocaux de la choucroute.....	27
Figure 8 : Preparation des choucroutes	27
Figure 9 : Representation graphique de la boite a moustache.....	36
Figure 10 : Perception du chou et la choucroute dans la population interrogée	41
Figure 11 : Variation de la temperature en fonction du temps : periode d'observation allant du 15 / 04 au 05 / 05 /2025.	42
Figure 12 : Variation de l'humidite relative de l'air en fonction du temps : periode d'observation allant du 15 / 04 au 05 / 05 /2025.	44
Figure 13 : Evolution du pH au cours de la fermentation.....	45
Figure 14 : Evolution du taux d'acidite titrable au cours de la fermentation.....	46
Figure 15 : Evolution du °Brix au cours de la fermentation	47
Figure 16 : Evolution du taux de vitamine c de la choucroute entiere au cours de la fermentation.	48
Figure 17 : Evolution du taux de vitamine c de la choucroute (phase liquide) au cours de la fermentation.	49
Figure 18 : Fermentation spontanee avec l'ajout d'un poids en verre	50
Figure 19 : Fermentation spontanee sans ajout de poids.....	50
Figure 20 : Resultats de la CCM sur plaque de silice.	53
Figure 21 : Teneurs en polyphenols totaux (exprimees en mg eag /100g de matiere fraiche) des extraits ethanoliqes du chou frais et de la choucroute obtenue aux 18 ^e et 21 ^e jours de fermentation. les memes lettres alphabetiques sur les colonnes indiquent l'absence d'une	

différence significative ($p \leq 0,05$) entre les moyennes correspondantes dans chou frais et la choucroute.	54
Figure 22 : Activité antiradicalaire des extraits éthanoliques contre le radical DPPH° (exprimée en % d'inhibition du radical DPPH°) du chou frais et de la choucroute obtenue aux 18 ^e et 21 ^e jours de fermentation. Les mêmes lettres alphabétiques sur les colonnes indiquent l'absence d'une différence significative ($p \leq 0,05$) entre les moyennes correspondantes.	56
Figure 23 : Pouvoir réducteur (exprimé en mg eq.vit c /100g de matière fraîche) des extraits éthanoliques du chou frais et de la choucroute obtenue aux 18 ^e et 21 ^e jours de fermentation. Les mêmes lettres alphabétiques sur les colonnes indiquent l'absence d'une différence significative ($p \leq 0,05$) entre les moyennes correspondantes.	57
Figure 24 : Photographie de bactéries lactiques de genre bacilles sur gélose MRS et sous microscope optique.....	60
Figure 25 : Photographie de bactéries lactiques de genre coque sur gélose M17 et sous microscope optique.....	60
Figure 26 : Histogramme représentant la fréquence (en %) des réponses au test hédonique selon l'échelle de notes de 1 à 9 pour l'évaluation sensorielle de la choucroute.	62

Introduction générale



Introduction

Actuellement, la fermentation végétale retient une attention grandissante, en raison de ses multiples avantages, alliant valorisation nutritionnelle et impacts bénéfiques sur la santé humaine. **(Begrache, 2021)**.

Les recherches menées ces dernières années ont mis en évidence les nombreux bienfaits de la fermentation lactique des légumes. Cette méthode permet notamment de prolonger leur durée de stockage **(Bautista et al., 2020)** tout en réduisant les substances antinutritionnelles **(Patel et al., 2023)**. De plus, elle optimise la disponibilité biologique des vitamines et des minéraux, améliore la digestibilité des produits fermentés et accroît leurs capacités antioxydantes **(Breidt et al., 2013)**. **(Chilton et al., 2015)** recommandent aux autorités sanitaires du monde entier d'inclure les aliments fermentés dans les guides alimentaires. Plus récemment, la consommation de légumes fermentés, en particulier la choucroute, a été associée à de faibles taux de mortalité liés à la COVID-19 dans les pays d'Asie de l'Est, d'Europe centrale et des Balkans **(Bousquet et al., 2021)**.

Le chou est connu pour ses qualités nutritionnelles exceptionnelles, notamment sa richesse en antioxydants et ses propriétés bénéfiques, incluant des effets anti carcinogènes, anti-inflammatoires, anti-hyperglycémiques, diurétiques et antimicrobiens **(Andernach et al., 2023)**. De plus, lorsqu'il est soumis à un processus de fermentation, le chou devient une source précieuse de probiotiques et de fibres, contribuant ainsi à son intérêt pour la santé humaine **(Uthpala et al., 2020)**.

La choucroute est un aliment fabriqué à partir de choux blancs (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.f. *alba*) salés et fermentés dans des conditions bien spécifiques et à une température optimale de croissance qui varie entre 18 °C et 22°C **(Srivastava, 2008)**. **(Thakur et al., 2017)** ainsi que **(Holzapfel et al., 2008)** ont démontré qu'une basse température (15 –20 °C) était la plus favorable au bon déroulement de la fermentation et à l'obtention d'une choucroute de haute qualité. Des températures plus basses ralentissent le début de la fermentation tandis que des températures plus élevées peuvent entraîner une production accélérée d'acide ce qui peut donner un produit au goût atypique **(Holzapfel et al., 2008)**.

On distingue généralement deux types de fermentation : la fermentation spontanée (naturelle) et la fermentation induite.

La fermentation spontanée est aujourd'hui encore largement utilisée dans la production domestique traditionnelle de légumes fermentés en Afrique, en Asie, en Europe et en Amérique latine (**Frias et al., 2017**). Il convient également de noter que cette fermentation naturelle de la choucroute peut se produire avec des teneurs en sodium plus faibles, conformément aux recommandations de la FDA sur la réduction volontaire du sodium dans les aliments (**Khanna, 2019**). Il a été aussi rapporté que le jus de chou fermenté spontanément présente une meilleure palatabilité par comparaison au produit issu d'une fermentation contrôlée (**Karovičová et Kohajdová, 2003**). De plus, l'élimination partielle ou complète des α -galactosides, des tanins, de l'acide phytique et de l'activité inhibitrice de la trypsine a été obtenue dans les haricots rouges grâce à ce type de fermentation (**Frias et al., 2017**). Toutefois, il est important de prendre en compte le risque associé à l'utilisation de la fermentation spontanée en termes de présence possible de souches microbiennes dangereuses pour la santé humaine (**Capozzi et al., 2017**). Cela dit, le processus de fermentation des aliments, en général, est susceptible d'impliquer la production d'amines biogènes à des niveaux sûrs alors qu'en quantités excessives, elles peuvent représenter un risque pour la santé des consommateurs (**Ruby et al., 2023**).

En Algérie, la consommation et les bienfaits des aliments lactofermentés, la choucroute en particulier, restent peu étudiés. A notre connaissance, le premier travail réalisé sur le sujet, dans des conditions isothermes, est décrit par (**Abbas et al., 2020**).

Le but du présent travail vise à évaluer la faisabilité de la fermentation lactique spontanée des choux pommés dans la wilaya de Tizi-Ouzou, dans les conditions ambiantes (température non contrôlée).

PARTIE I



Synthèse Bibliographique

CHAPITRE I

Généralités sur la fermentation

I.1 Définition

Le concept de fermentation remonte au XVIème siècle, tirant son étymologie du mot latin "Fevere", signifiant "bouillir". Cette appellation fait référence aux bulles de dioxyde de carbone générées pendant le processus, créant une apparence similaire à celle de l'ébullition (**Bourat, 1993**). Sur le plan biochimique, la fermentation désigne la dégradation anaérobie de substances organiques complexes, notamment les glucides comme le glucose, sous l'action de micro-organismes. Ce processus, caractérisé par une production d'énergie, s'effectue en l'absence d'oxygène, avec une molécule organique servant d'accepteur final d'électrons et une génération d'ATP via la phosphorylation au niveau du substrat (**Lane et al., 2010**).

Au-delà de sa dimension biochimique, la fermentation est une technique essentielle pour la conservation des aliments. Le développement de populations microbiennes, qu'elles soient indigènes ou ajoutées intentionnellement, provoque des transformations chimiques et structurales qui stabilisent le produit tout en prolongeant sa durée de vie. En parallèle, la fermentation enrichit les qualités organoleptiques des aliments en générant des arômes et des saveurs distinctives, valorisant ainsi leur attrait gustatif (**Chojnacka, 2006 ; Anguly et Subha, 2013**).

I.2 Types De Fermentation

La fermentation se décline en différents types (Tableau I), définis soit par le substrat consommé au départ, soit par les produits générés en fin de processus. Ainsi, on identifie principalement la fermentation lactique, la fermentation acétique et la fermentation alcoolique, entre autres. Chacune de ces formes repose sur des réactions biochimiques particulières et conduit à des résultats finaux distincts, reflétant la diversité des applications possibles de ce procédé (**Valence et al., 2019**).

Tableau I : Les types de fermentation et microorganismes impliquées

Types de fermentation	Principes	Bactéries	Applications	Référence
Fermentation alcoolique	Production CO ₂ et l'éthanol à partir du sucre	-Saccharomyces cerevisiae	Vin et bière	(Langlois, 1994 et Sembene, 2002).
Fermentation lactique	Production de l'acide lactique à partir de glucide	-Lactobacillus - Streptococcus et certains Bacillus	Produits Laitiers	
Fermentation acétique	production d'énergie anaérobie, en présence de glucides et de bactéries	-Gluconobacter-Acetobacter	Fermentation gazogène dans les fromages à pâte cuite et production d'arôme	

1.2.1 La fermentation alcoolique

Elle implique des microorganismes différents : *Oenococcus oenos*, *Saccharomyces cerevisiae* ; dont lequel cette dernière transforme le saccharose et le maltose en éthanol et CO₂ :

Saccharose => Glucose => pyruvate => Ethanol + CO₂.

Maltose => Glucose => Pyruvate => Ethanol + CO₂ (malolactique microorganismes).

(Valence et al., 2019)

1.2.2 La fermentation acétique

Dans ce type différents microorganismes sont impliqués tel que: *Acetobacter aceti*, la réaction suivant montre la transformation de saccharose en acide acétique :

Saccharose => Ethanol => Acide acétique **(Valence et al., 2019)**

1.2.3 La fermentation lactique

Qui impliquent des microorganismes différents souches : *Lactococcus lactis*, *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus delbrueckii*, *Propionibacterium freudenreichii* , selon la réaction suivante :

Stachyose, Lactose => Glucose => pyruvate => Acide lactique **(Valence et al., 2019).**

I.3 L'acide lactique

L'acide lactique est un acide organique alpha hydroxyle de formule chimique $C_3H_6O_3$, également appelé acide 2-hydroxypropanoïque (Figure1). Il est produit par un mécanisme biochimique appelé glycolyse, où le pyruvate est transformé en lactate par l'addition d'un proton (H^+). Ainsi, bien que souvent associé à la fermentation, l'acide lactique peut aussi résulter d'autres processus métaboliques, impliquant des cellules de la peau, des muscles et des globules rouges (Abedi et Hashemi, 2020).

Du point de vue chimique, l'acide lactique possède un carbone asymétrique, ce qui donne lieu à deux énantiomères : la forme D (-) ou (R), et la forme L (+) ou (S). Cette dernière, décrite comme ayant une haute pureté optique, est celle qui joue un rôle biologique prédominant (Rawoof et al., 2020).

Il peut être produit par deux voies principales : la synthèse chimique à partir d'hydrocarbures, qui génère une forme racémique D/L (\pm), ou la fermentation microbienne, qui permet d'obtenir des formes énantiomériques pures comme L (+) ou D (-) avec une haute pureté optique (Rawoof et al., 2020), (Figure 1).

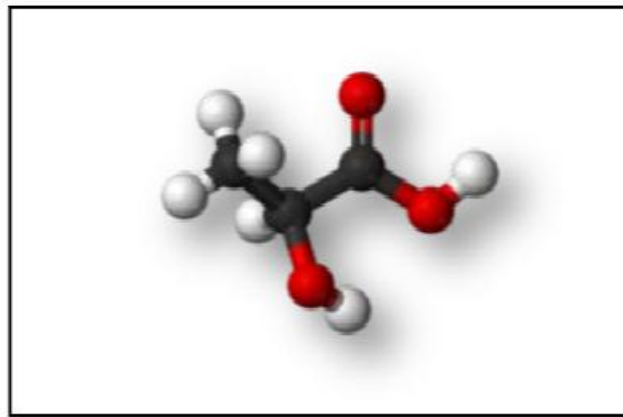


Figure 1 : Structure tridimensionnelle de l'acide lactique (Abedi et Hashemi, 2020)

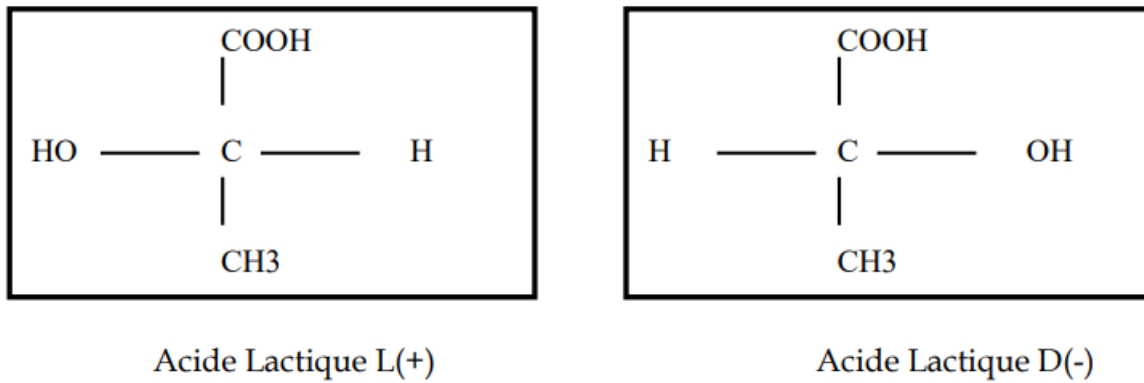


Figure 2 : Les deux isomères optiquement actifs de l'acide lactique (Narayanan et *al.*, 2004)

I.4 Voies de la fermentation lactique

Les bactéries lactiques se divisent en deux groupes principaux en fonction du produit final qu'elles génèrent au cours de la fermentation : les homofermentaires et les hétérofermentaires, (Figure 3).

I.4.1 Voie homofermentaire

Cette voie repose sur le métabolisme glycolytique, au cours duquel les bactéries lactiques décomposent un hexose, comme le glucose, en suivant plusieurs étapes biochimiques pour produire du pyruvate. Ce dernier est ensuite réduit en un seul produit final : l'acide lactique (Mathur et *al.*, 2020).

Les bactéries qui utilisent majoritairement cette voie appartiennent au genre *Streptococcus* ainsi qu'à certaines espèces du genre *Lactobacillus*, telles que *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus caucasicus*, *Lactobacillus lactis* et d'autres (Makhloufi, 2011).

I.4.2 Voie hétérofermentaire

Dans cette voie métabolique, les bactéries lactiques ne produisent pas uniquement de l'acide lactique lors de la fermentation du glucose. Elles génèrent également de l'éthanol et du dioxyde de carbone (CO₂) comme sous-produits. Ces bactéries sont qualifiées d'hétérofermentaires et représentent un groupe important parmi les bactéries lactiques. On retrouve dans cette catégorie des genres tels que *Leuconostoc* ainsi que certaines espèces de *Lactobacillus* (Mathur et al., 2020).

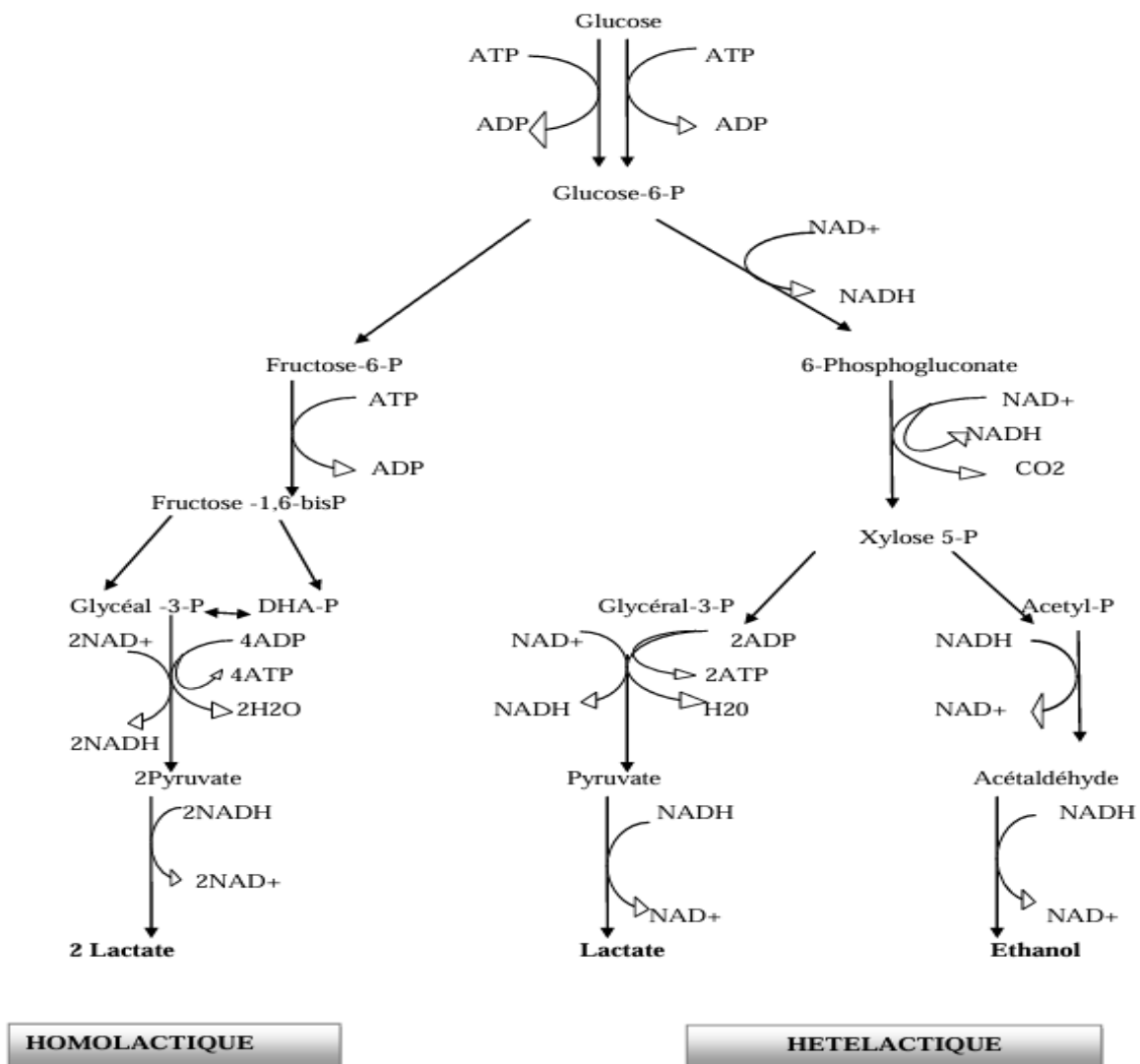


Figure 3 : Voies d'assimilation du carbone des bactéries lactiques à partir de différents sucres présents dans les sources renouvelables (Rawoof et al., 2020)

I.5 Bienfait des légumes lactofermenté

Les légumes lactofermentés sont riches en bactéries bénéfiques qui améliorent la digestion et renforcent l'immunité. Ils augmentent les nutriments, comme les vitamines du groupe B, facilitent l'assimilation des protéines et des lipides, et réduisent les inflammations. Ces aliments possèdent également des propriétés antioxydantes, anticancéreuses et anti-inflammatoires, utiles pour prévenir des maladies comme le cancer colorectal (**Ashok et al., 2023**).

La fermentation élimine les anti-nutriments, libérant des composés bioactifs tels que le GABA et des inhibiteurs de l'enzyme de conversion de l'angiotensine, bénéfiques contre la dépression et l'hypertension. Les bactéries favorisent aussi la récupération musculaire, la cicatrisation, l'élimination des toxines et réduisent le stress digestif (**Patel et al., 2023**).

CHAPITRE II

Les Bactéries lactiques

II.1 Généralité sur les bactéries lactiques

Les bactéries lactiques constituent un groupe phylogénétiquement hétérogène, incluant des genres tels que les *Lactobacillus*, *Enterococcus*, *Streptococcus* et *Lactococcus*. Leur caractéristique commune réside dans leur capacité à produire de l'acide lactique comme produit final de la fermentation des sucres (Tailliez, 2001). Ces micro-organismes présentent une grande diversité d'espèces adaptées à divers environnements (Tailliez, 2001).

Les bactéries lactiques jouent un rôle essentiel dans l'industrie alimentaire, notamment dans la production laitière, mais également dans la fermentation de légumes marinés, de produits de boulangerie, de boissons fermentées, de viande et de poisson. Leur action améliore la texture, la saveur et la production de composés aromatiques (Callewaert et al., 2000). En abaissant le pH grâce à la production d'acide lactique, elles contribuent à la bio préservation des aliments (Carmen et al., 2000). De plus, elles inhibent la croissance des bactéries pathogènes et préviennent la détérioration des denrées alimentaires grâce à la synthèse de substances antimicrobiennes variées (Fang et al., 2006 ; Zdolec et al., 2007).

II.2 Origine et habitat des bactéries lactiques

Les bactéries lactiques sont largement répandues dans la nature et se trouvent principalement associées à des substrats riches en sucres simples. Elles peuvent être isolées de produits laitiers tels que le lait et le fromage, ainsi que de viandes, de végétaux, de boissons fermentées comme le vin et la bière, et même de produits de boulangerie comme le pain. Certaines espèces colonisent également le tube digestif de l'homme et des animaux (Tailliez, 2001).

Ces bactéries démontrent une grande plasticité écologique, leur permettant de s'adapter à des milieux variés, malgré des différences significatives au niveau physico-chimique et biologique (Tailliez, 2001).

II.3 Caractéristiques des bactéries lactiques

Les bactéries lactiques présentent une diversité morphologique notable, incluant des formes sphériques (*coccoides*) représentées par les genres *Streptococcus* et *Lactococcus*, des formes allongées (*bacillaires*) typiques des *Lactobacillus*, ainsi que des formes ovoïdes observées chez certaines espèces du genre *Leuconostoc* (Corrieu et luquet, 2008). Leurs principales caractéristiques physiologiques comprennent une coloration

Gram positive, une absence de formation de spores (*asporogène*), un métabolisme anaérobie strict ou facultatif avec tolérance à l'oxygène, et une immobilité générale. Elles possèdent également une capacité de croissance optimale dans une plage de températures comprise entre 10°C et 45°C et un pH optimal de croissance compris entre 4,0 et 4,5. Leur métabolisme est caractérisé par la production d'acide lactique comme principal produit final de fermentation **(Barinov, 2011)**. Ces micro-organismes sont généralement dépourvus de catalase, de nitrate réductase ou de cytochrome oxydase, bien que certaines souches puissent présenter une activité enzymatique limitée sous des conditions spécifiques. Elles possèdent également une activité protéolytique, leur permettant de dégrader les protéines en peptides et acides aminés **(Rodriguez et al., 2003)**.

Outre l'acide lactique, ces bactéries produisent divers métabolites secondaires, tels que des acides organiques, qui abaissent le pH du milieu et inhibent la croissance de micro-organismes indésirables. Elles synthétisent également d'autres composés antimicrobiens, notamment le peroxyde d'hydrogène, le diacétyle, la reutérine, le dioxyde de carbone et des bactériocines, contribuant ainsi à leur rôle dans la bio-réserve des aliments **(Curiel et al., 2015)**. Ces micro-organismes ont des besoins nutritionnels complexes, nécessitant des sources exogènes d'acides aminés, de peptides, de vitamines, de sels minéraux, d'acides gras et de glucides fermentescibles pour assurer leur croissance et leur métabolisme **(Curiel et al., 2015)**.

II.4 Classification des bactéries lactiques

La taxonomie des bactéries lactiques a évolué considérablement depuis la première description du *Bacterium lactis*, aujourd'hui connu sous le nom de *Lactococcus lactis* **(Guetarni, 2013)**.

Au cours des dernières décennies, le nombre d'espèces identifiées a augmenté de manière significative, grâce aux avancées en biologie moléculaire et en phylogénétique. Ces progrès ont conduit à des réorganisations taxonomiques, incluant la fusion de certaines espèces ou la création de nouveaux genres basés sur des critères génétiques et biochimiques **(Guetarni, 2013)**, (Figure4).

Les genres les plus couramment associés aux bactéries lactiques comprennent *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Streptococcus*, *Enterococcus*, *Pediococcus*, *Leuconostoc*, *Oenococcus*, *Tetragenococcus*, *Carnobacterium* et *Weissella* (Wang et al., 2023), (Tableau II).

La classification moderne repose désormais sur des analyses moléculaires, telles que l'étude des séquences des protéines et des acides nucléiques, permettant de construire des arbres phylogénétiques précis représentant les relations évolutives entre les différents genres de bactéries lactiques, (Zheng et al., 2020).

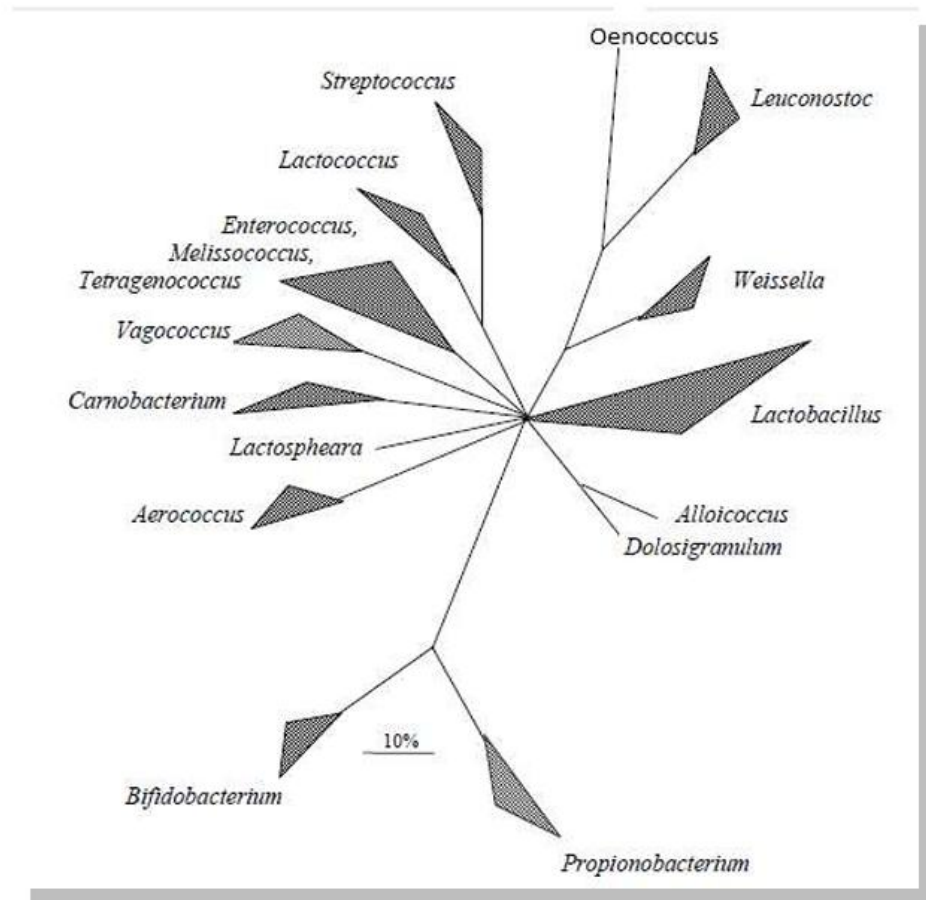


Figure 4 : Arbre phylogénétique des principaux genres de bactéries lactiques et des genres associés, obtenu par analyse des ARNr 16S (Zheng et al., 2020).

Tableau II : Différents genres de bactéries lactiques (Hakim et al., 2023).

Genre	Morphologie	Fermentation	Caractéristiques principales	Habitat Principaux
Lactobacillus	Bacilles	Homofermentaire ou Hétérofermentaire	Thermophiles ou mésophiles	Homme, Produits laitiers, Carné, Végétaux
Carnobacterium	Bacilles	Hétérofermentaire	Psychotropes peu acidotolérantes	Produits carné, poissons, Produits laitiers
Lactococcus	Coques	Homofermentaire	Mésophiles croissance a 10	Produits laitiers, Végétaux
Streptococcus	Coques	Homofermentaire	Thermophiles	Produits laitiers
Enterococcus	Coques	Hétérofermentaire	Mésophiles, croissance a 45°C et non a 10°C, thermorésistante	Intestin de l'homme et des animaux, Produits laitiers
Pediococcus	Coque	Homofermentaire	Mésophiles Halotolérants	Bière, Produits végétaux, Saucissons
Tetragencoccus	Coque en tétrades	Homofermentaire	Mésophiles halophiles	Saumures
Leuconostoc	Coque	Hétérofermentaire	Mésophiles	Produits végétaux, Produits laitiers
Oenococcus	Coque	Hétérofermentaire	Mésophiles	Vin
Bifidobacterium	Forme irrégulière	Acide acétique et lactique	Mésophiles	Intestin de l'homme et animaux
Vagococcus	Coque mobile	Homofermentaire	Mésophiles	Intestin de l'homme et animaux, Produits laitiers

II.5 Propriétés antimicrobiennes des bactéries lactiques

II.5.1 Les bactériocines

Les bactériocines sont des peptides ou protéines antibactériens produits par certaines bactéries lactiques, capables d'inhiber la croissance de bactéries Gram positif et, dans certains cas, Gram négatif. Elles peuvent également présenter une activité contre d'autres bactéries lactiques. Ces composés sont classés en trois catégories principales selon leur composition et leur structure : les lantibiotiques, les non-lantibiotiques, et les grosses molécules sensibles à la chaleur (Isabelle, 2011).

II.5.2 Autres substances antimicrobiennes

En plus des bactériocines, les bactéries lactiques produisent divers métabolites antimicrobiens au cours de la fermentation, tels que les acides organiques (acide lactique, acide acétique), le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂), le dioxyde de carbone (CO₂) et le diacétyl. Ces substances jouent un rôle clé dans l'inhibition de micro-organismes pathogènes ou contaminants. Les acides organiques, en particulier, exercent une action antimicrobienne efficace contre les levures et les bactéries Gram positif ou négatif, contribuant ainsi à la biopréservation des aliments (Isabelle, 2011).

II.6 Caractères technologiques des bactéries lactiques

L'utilisation des bactéries lactiques dans l'industrie alimentaire repose sur leurs propriétés technologiques variées. Ces caractéristiques incluent leur capacité à acidifier les substrats grâce à la production d'acide lactique, leur activité enzymatique (protéolytique, peptidasique et lipolytique), ainsi que leur aptitude à synthétiser des métabolites d'intérêt tels que le peroxyde d'hydrogène, les acides organiques et les bactériocines. Ces micro-organismes influencent également la texture, la saveur et les propriétés organoleptiques des aliments, notamment par la production de composés aromatiques essentiels dans les fromages et autres produits fermentés. Leur rôle est central dans la transformation de matières premières diverses, permettant la fabrication de produits comme les laits fermentés, les fromages, les olives fermentées et certains vins. L'industrie laitière reste le principal secteur utilisateur de bactéries lactiques, souvent sous forme de ferments commerciaux (Slamnia et al., 2018).

➤ **Les exo-polysaccharides**

Au cours de la fermentation, les bactéries lactiques synthétisent des polysaccharides de surface, qui se présentent sous deux formes distinctes : les exopolysaccharides (EPS), excrétés dans le milieu environnant, et les polysaccharides capsulaires (PSC), qui restent attachés à la surface cellulaire. Ces polymères de sucres sont classés en deux grandes catégories selon leur composition : les hétéropolysaccharides (HePS) et les homopolysaccharides (HoPS), (**Zannini et al., 2016**). Ces substances jouent un rôle fondamental dans l'amélioration de la texture et des propriétés rhéologiques des aliments fermentés. Les espèces *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Weissella*, *Lactococcus* et *Streptococcus* sont connues pour synthétiser des EPS, (**Zannini et al., 2016**)

CHAPITRE III

Chou et choucroute

III.1 Le chou

Le chou, une plante appartenant à la famille des Brassicacées, est originaire de la région méditerranéenne. Cultivé mondialement pour ses feuilles comestibles, il est apprécié pour sa richesse nutritionnelle et ses multiples propriétés bénéfiques pour la santé (**Zhang et al., 2022**).

Sur le plan nutritionnel, le chou se distingue par sa teneur élevée en vitamines, notamment la vitamine C, la vitamine K et les vitamines du groupe B. Il contient également des minéraux essentiels tels que le calcium, le potassium et le magnésium, ainsi que des composés phytochimiques reconnus pour leurs bienfaits, comme les flavonoïdes et les dérivés soufrés. Ces substances bioactives contribuent à réduire le risque de maladies cardiovasculaires, de certains types de cancers et d'autres affections chroniques, faisant du chou un aliment aux vertus préventives significatives (**Liu et al., 2022**).

III.1.1 Variété de chou

La famille des Brassicacées, anciennement désignée sous le nom de Crucifères, regroupe plus de 360 genres et environ 3709 espèces. Ces plantes, majoritairement herbacées, sont principalement répandues dans l'hémisphère Nord. Elles comprennent des espèces cultivées pour divers usages : la production d'huile (colza), la consommation humaine ou animale (chou, navet, etc.), ainsi que des plantes ornementales telles que la giroflée et la lunaire (**Balkaya et al., 2005**).

La classification des choux s'avère complexe en raison de leur grande diversité morphologique, de leurs variations de couleur et de leurs multiples utilisations culinaires, qui diffèrent selon les régions et les traditions culturelles. Cette diversité, associée à leur évolution continue, rend leur catégorisation difficile tant sur le plan botanique que gastronomique (**Witzel et al., 2021**).

Néanmoins, les efforts de classification permettent une meilleure compréhension de la botanique des choux (Tableau III), facilitant leur étude, leur conservation et la communication autour de leurs caractéristiques et usages spécifiques (**Balkaya et al., 2005**).

Tableau III : Variétés de chou : caractéristiques et longueurs (Witzel et al., 2021).

Variété	Description	longueur
Chou pommé (Brassica oleracea var. capitata)	Pomme serrée de feuilles lisses ou frisées	20-60 cm
Chou frisé (Brassica oleracea var. crispa)	Feuilles vert foncé frisées ou ondulées	30-100 cm
Chou de Bruxelles (Brassica oleracea var. gemmifera)	Petits choux pommés poussant serrés sur une tige centrale	5-8 cm
Chou-fleur (Brassica oleracea var. botrytis)	Inflorescence charnue blanche ou jaune	15-25 cm
Chou romanesco (Brassica oleracea var. botrytis romanesco)	Chou-fleur vert avec une forme fractale	10-20 cm
Brocoli (Brassica oleracea var. italica)	Inflorescence vert foncé avec des bourgeons serrés	10-20 cm
Chou kale (Brassica oleracea var. sabellica)	Feuilles vert foncé non pommées, souvent frisées	20-50 cm
Chou-rave (Brassica oleracea var. gongylodes)	Racine bulbeuse renflée au-dessus du sol	30-80 cm
Komatsuna (Brassica rapa var. japonica)	Feuilles vert foncé dentelées et tiges fines vertes.	20-30 cm
Mizuna (Brassica rapa var. nipposinica)	Feuilles vert foncé profondément découpées et tiges fines vertes.	20-40 cm
Chou chinois (Brassica rapa var. pekinensis)	Feuilles longues et étroites vert clair regroupées en forme de cylindre allongé.	30-50 cm
Chou rouge (Brassica oleracea var. capitata f. rubra)	Pomme rouge vif, saveur légèrement piquante	20-30 cm
Navet (Brassica rapa var. rapa)	Racine blanche arrondie, saveur douce et piquante	10-20 cm

III.1.2 Composition biochimique du chou

Le chou, un légume appartenant à la famille des crucifères et disponible sous diverses variétés, est particulièrement apprécié pour sa teneur élevée en composés phytochimiques aux propriétés bénéfiques pour la santé. Ces substances sont associées à de multiples effets préventifs et

Thérapeutiques, faisant du chou un aliment clé dans le cadre d'une alimentation équilibrée et saine (Kamal et al., 2022).

III.1.2.1 Glucosinolates

Les glucosinolates sont des hétérosides sulfurés caractérisés par une structure commune, comprenant un groupe aglycone lié à une unité de sucre. À ce jour, plus de 120 glucosinolates ont été identifiés dans le règne végétal, dont environ une trentaine sont présents dans le chou. Cette diversité structurale confère aux glucosinolates une large gamme de propriétés biologiques. Cependant, ces molécules ne sont pas biologiquement actives à l'état natif. Leur potentiel se manifeste lorsqu'ils sont hydrolysés par l'enzyme myrosinase, libérant ainsi des métabolites actifs tels que les isothiocyanates (Kamal et al., 2022).

Les composés des glucosinolates ont été largement étudiés pour leurs effets potentiels dans la prévention du cancer, en particulier en raison de leur capacité à induire la mort des cellules cancéreuses, à inhiber la croissance tumorale et à protéger l'ADN contre les dommages (Kamal et al., 2022).

III.1.2.2 Isothiocyanates

Les isothiocyanates se forment par hydrolyse enzymatique des glucosinolates, principalement lors de la mastication ou du hachage du chou. Plus de 100 isothiocyanates ont été identifiés, chacun présentant des propriétés biologiques spécifiques. Ils sont connus pour leurs propriétés antimicrobiennes, qui peuvent aider à combattre les infections bactériennes, fongiques et virales. De plus, ils ont également démontré des effets anti-inflammatoires en inhibant les enzymes inflammatoires et en régulant les voies de signalisation immunitaires (Kamal et al., 2022).

III.1.2.3 Caroténoïdes

Le chou est une source importante de caroténoïdes tels que le bêta-carotène, la lutéine et la zéaxanthine. La lutéine et la zéaxanthine se concentrent dans la rétine de l'œil, où elles agissent comme des antioxydants protégeant contre les dommages causés par la lumière bleue et les radicaux libres, contribuant ainsi à maintenir une vision saine, en particulier avec l'âge (Nih, 2021).

III.1.2.4 Polyphénols

Les polyphénols sont des antioxydants naturels présents dans de nombreux aliments d'origine végétale. Dans le chou, ils comprennent des composés tels que les flavonoïdes, les acides phénoliques et les anthocyanes. Ces composés ont démontré des effets anti-inflammatoires, cardioprotecteurs et neuroprotecteurs dans diverses études. Ils peuvent également aider à réguler la glycémie et à améliorer la santé cardiovasculaire en réduisant le risque de formation de caillots sanguins et en abaissant la pression artérielle (**Slavin et al., 2012**).

III.1.2.5 Fibres alimentaires

Le chou est une excellente source de fibres alimentaires, des glucides non digestibles qui jouent un rôle crucial dans la santé digestive. Elles favorisent le transit des aliments à travers le tractus gastro-intestinal, prévenant ainsi la constipation et contribuant à une meilleure santé intestinale. De plus, les fibres alimentaires procurent une sensation de satiété, ce qui peut aider à contrôler le poids en réduisant la suralimentation (**Slavin et al., 2012**).

III.1.2.6 Minéraux

Le potassium joue un rôle crucial dans la régulation de l'équilibre des fluides, de la pression artérielle et des contractions musculaires, y compris les battements cardiaques. Le calcium joue un rôle crucial dans la santé des os et des dents, ainsi que dans la gestion des muscles et des nerfs. Dans le corps, le magnésium joue un rôle essentiel dans plus de 300 réactions enzymatiques, telles que la génération d'énergie, la production de protéines et la régulation de la tension artérielle (**Slavin et al., 2012**).

III.1.2.7 Anthocyanines

Les anthocyanines sont des pigments naturels appartenant à la famille des flavonoïdes. Elles ont une composition chimique diversifiée, offrant une grande variété de teintes allant du rouge au bleu. Les anthocyanines sont particulièrement abondantes dans le chou rouge et le chou violet. Les antioxydants puissants jouent un rôle dans la neutralisation des radicaux libres dans le corps, ce qui permet de diminuer le stress oxydatif et le risque de maladies chroniques comme les maladies cardiovasculaires, le diabète et certaines formes de cancer (**Kamal et al., 2022**).

III.1.4 Intérêt nutritionnel et diététique du chou

Le chou pommé est un légume à haute densité nutritionnelle, reconnu pour sa richesse en vitamines, fibres et composés bioactifs. Il contient notamment de la vitamine C, un puissant antioxydant qui soutient le système immunitaire et protège les cellules contre le stress oxydatif. La vitamine K qu'il renferme joue un rôle essentiel dans la coagulation sanguine et dans la modulation des processus inflammatoires. De plus, il contient des vitamines du groupe B comme la vitamine B6, essentielle au métabolisme des protéines, et l'acide folique (vitamine B9), nécessaire à la synthèse de l'ADN et au développement cellulaire (Yaribeygi et al., 2020).

Le chou est également une source de β -carotène (précurseur de la vitamine A), qui contribue à la santé visuelle et au renouvellement cellulaire. Sur le plan digestif, sa teneur élevée en fibres, majoritairement insolubles, améliore le transit intestinal, renforce la satiété, et contribue à une meilleure régulation du métabolisme glucidique. Par ailleurs, le chou est riche en composés phénoliques, aux effets antioxydants, anti-inflammatoires et antimicrobiens, qui renforcent ses propriétés fonctionnelles et protectrices. Grâce à cet ensemble de nutriments et de métabolites secondaires, le chou pommé est un ingrédient clé dans une alimentation saine, préventive et adaptée aux besoins nutritionnels modernes. (Uuh-Narvaez et Segura-Campos, 2021).

Grâce à cette richesse nutritionnelle, une consommation régulière de chou peut contribuer à la prévention de plusieurs maladies chroniques, notamment le diabète de type 2, les maladies cardiovasculaires, l'obésité, certains cancers, ainsi que les troubles digestifs. Cela fait du chou pommé un aliment fonctionnel aux bénéfices multiples, qui mérite d'être mieux valorisé dans l'alimentation quotidienne (Yaribeygi et al., 2020).

III.1.5 Mode d'utilisation des choux

Le chou (*Brassica oleracea* var. *capitata*) est un légume crucifère polyvalent, largement utilisé dans l'alimentation humaine sous diverses formes culinaires.

- **Consommation crue** : Le chou vert est souvent consommé cru en salades, apportant une texture croquante et une richesse en vitamines C et K (Yang et al., 2019).

- Cuisson : Cuit à la vapeur, sauté ou intégré dans des plats mijotés, tels que les soupes et les ragoûts, ce qui améliore sa digestibilité tout en conservant ses nutriments essentiels (**Yang et al., 2019**).
- Conservation **par fermentation** : Le chou vert est utilisé dans la préparation de produits fermentés comme la choucroute, qui prolonge sa durée de conservation et enrichit sa valeur nutritionnelle (**Yang et al., 2019**).

III.2 Historique de la choucroute

Le terme « choucroute » trouve son origine dans le mot allemand « Sauerkraut », qui signifie littéralement « chou aigre ». Une évolution linguistique a également donné naissance au terme « Sürkrüt », composé de « sür » (aigre) et « krüt » (herbe) (**Guignard, 2004**). L'histoire de la choucroute remonte à la Chine, où elle constituait un aliment de base pour les ouvriers ayant participé à la construction de la Grande Muraille. Selon une légende datant du III^e siècle avant J.-C., des travailleurs chinois auraient découvert le chou fermenté après un hiver rigoureux. Ayant laissé leur nourriture sous la neige, ils constatèrent à leur retour que le chou, protégé de l'air par la couche glacée, avait naturellement fermenté, donnant naissance à une saveur aigre caractéristique. Ce procédé aurait ensuite été transmis en Europe grâce à des explorateurs tels que Marco Polo (**Farnworth, 2005**).

En Europe, les Allemands adoptèrent cette méthode de fermentation après des contacts avec les Mongols et les Tatars. Au XVI^e siècle, ils perfectionnèrent la technique en introduisant le sel comme agent de fermentation, ce qui permit à la choucroute de se répandre dans les régions voisines, notamment en Alsace. Cette région joua un rôle central dans la popularisation de la choucroute, transformant ce plat en une spécialité locale emblématique. L'Alsace devint ainsi la principale zone de production de chou destiné à la fabrication de la choucroute en France. À la fin du XX^e siècle, grâce aux progrès des transports et à son attrait gastronomique, la choucroute gagna en notoriété, passant d'un aliment rustique associé aux milieux ruraux à un aliment apprécié dans les cercles bourgeois, souvent présent sur les tables festives (**Farnworth, 2005**).

III.2.1 Généralités sur la choucroute

La choucroute est obtenue par fermentation lactique de chou blanc (*Brassica oleracea* var. *capitata* L. f. *alba*). Le chou émincé est mélangé avec du sel, puis pressé dans une cuve appropriée, créant un milieu anaérobie favorable à la fermentation (**Kusznierewicz et al., 2008**). Le jus libéré sert de substrat pour la croissance des bactéries lactiques naturellement présentes à la surface du chou, telles que *Leuconostoc mesenteroides*, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus plantarum* et *Pediococcus cerevisiae*, qui produisent de l'acide lactique, abaissant rapidement le pH et conférant au produit ses caractéristiques organoleptiques (**Kusznierewicz et al., 2008**).

La choucroute est un aliment peu calorique, tout en étant riche en fibres et en composés bioactifs bénéfiques pour la santé (Tableau IV).

Tableau IV : Valeurs nutritionnelle de la choucroute pour 100g (**Peñas et al., 2016**)

Nutriments	Quantité pour 100 g	(%)Valeur quotidienne
Calories	19 kcal	2
Glucides	1.78 g	2
Fibres alimentaires	2,9 g	10
Lipides	0,14 g	<1
Protéines	0.91 g	2
Sodium	750 mg	31
magnésium	43mg	6
calcium	30mg	4
Fer	1.47mg	4
Potassium	150 mg	5
Vitamine C	15 mg-75mg	38
Vitamine K	30 µg	25
Vitamine B9 (folate)	8 µg	2

III.2.2 Préparation traditionnelle des choucroutes

Le chou blanc frais, dense et débarrassé de ses feuilles externes abîmées, constitue l'ingrédient principal du procédé de fermentation, après avoir été finement découpé (Yang et al., 2019). Pour enrichir l'arôme de la choucroute, des épices telles que le cumin ou les baies de genièvre, ainsi que des aromates comme le laurier ou les graines de moutarde, sont ajoutés selon les traditions locales (Yang et al., 2019).

Le sel non iodé, tel que le sel gris ou le sel de mer, est utilisé pour favoriser l'extraction du jus du chou, stimuler la croissance des bactéries lactiques et inhiber les micro-organismes indésirables (Yang et al., 2019). Lorsque le jus naturellement libéré par le chou s'avère insuffisant pour assurer une immersion complète du substrat, une saumure complémentaire (25 g de sel par litre d'eau) est préparée et ajoutée (Yang et al., 2019).

La fermentation est réalisée dans des récipients inertes tels que des pots en verre ou des jarres en céramique, munis de couvercles hermétiques et de poids permettant de maintenir le chou immergé, assurant ainsi un environnement anaérobie favorable au développement des bactéries lactiques (Yang et al., 2019).

III.2.3 Fermentation de la choucroute

La fermentation de la choucroute est un processus en plusieurs étapes causée par deux types de bactéries lactiques : les hétérofermentaires et les homofermentaires. Au début, des bactéries comme *Leuconostoc mesenteroides* dominant car elles s'adaptent bien à un environnement légèrement acide, ou elles produisent de l'acide lactique, de l'acide acétique et du dioxyde de carbone (CO₂), abaissant rapidement le pH et créant des conditions anaérobies idéales pour les étapes suivantes (Liu et al., 2023 ; Satora et al., 2021).

Lorsque le pH atteint environ 3,5-4,0, des bactéries homofermentaires telles que *Lactobacillus plantarum* et *Pediococcus acidilactici* interviennent, produisant principalement de l'acide lactique pour stabiliser le produit et inhiber les micro-organismes indésirables (Yang et al., 2019 ; Satora et al., 2020).

En fin de fermentation, une coexistence entre les bactéries homofermentaires et hétérofermentaires permet de développer les arômes complexes caractéristiques de la choucroute grâce à la production d'acide acétique et d'éthanol (Yang et al., 2019). Ce processus assure non seulement la conservation du chou mais aussi l'amélioration de ses saveurs et de ses propriétés nutritionnelles (Liu et al., 2023).

III.2.5 Intérêt nutritionnel et diététique de la choucroute

La choucroute est considérée comme une source naturelle de probiotiques, grâce aux bactéries lactiques bénéfiques (BAL) telles que *Weissella* spp., *Leuconostoc mesenteroides*, *Lactiplantibacillus plantarum*, et *Pediococcus pentosaceus* (Gaudioso et al., 2022). Ces micro-organismes vivants survivent au pH acide de l'estomac et aux sels biliaires, colonisant ainsi efficacement le microbiote intestinal (Major et al., 2022). Une fois implantées, ces bactéries exercent des effets bénéfiques sur la santé, notamment pour l'amélioration de la digestion (Gaudioso et al., 2022).

Les probiotiques favorisent une meilleure absorption des nutriments et réduisent les troubles gastro-intestinaux. (Schropp et al., 2025)

Les composés antimicrobiens et métabolites produits par les bactéries lactiques bénéfiques (BL) présentes dans la choucroute modulent le système immunitaire tout en inhibant la croissance de bactéries pathogènes, offrant ainsi une protection efficace contre les infections (Major et al., 2022)

III.2.6 Conservation des choucroutes

La conservation de la choucroute repose sur les propriétés inhérentes au processus de fermentation lactique, qui crée un environnement hostile aux micro-organismes pathogènes tout en préservant les qualités organoleptiques et nutritionnelles du produit (Peñas et al., 2010).

Une fois la fermentation terminée, la choucroute peut être conservée au réfrigérateur pour ralentir le processus microbologique, la température basse (environ 4 °C) inhibe l'activité des bactéries lactiques résiduelles, stabilisant ainsi le produit, cette méthode permet une conservation prolongée, au-delà d'un an, tout en préservant la saveur et la texture (Thakur et al., 2017).

III.2.7 Processus industrielle de la fabrication de la choucroute

Le processus industriel de fabrication de la choucroute commence par la culture du chou, incluant la plantation dans les champs, la croissance végétative, puis la récolte, généralement mécanisée, suivie du transport vers l'unité de transformation **(B et M, 2018)**.

À l'arrivée, les choux sont soumis à l'étrégnage, une étape de nettoyage et de préparation. Ensuite, le chou est préparé industriellement par effeuillage (retrait des feuilles externes), parage (suppression des parties abîmées), découpe en fines lanières à l'aide de machines spécifiques, puis salage mécanique avec un dosage précis de sel pour initier la fermentation **(B et M, 2018)**.

Le chou salé est alors encuvé dans de grandes cuves inoxydables ou silos, où démarre la fermentation lactique naturelle ou dirigée par ajout de ferments lactiques. Durant cette phase, les sucres du chou sont transformés en acide lactique, ce qui confère à la choucroute sa conservation, son goût acidulé et sa stabilité microbiologique. Une fois la fermentation terminée, le produit est conditionné selon les besoins du marché : en choucroute crue non pasteurisée, pasteurisée (brute), précuite ou cuisinée (avec ajout d'aromates ou d'ingrédients). Ce procédé garantit un produit fini stable, sûr, et conforme aux exigences de qualité industrielle **(B et M, 2018)**.

PARTIE II



Etude Expérimentale

CHAPITRE I :
Matériel et méthodes

I. Mini enquête d'opinion sur la consommation de la choucroute à Tizi-Ouzou

Dans le cadre de ce travail, une mini-enquête a été menée auprès de 52 personnes en utilisant pour cela le questionnaire non structuré suivant: a)-« Avez-vous déjà entendu parler de la choucroute (en français), sauerkraut (en anglais), « Locrambe i khamren » (en kabyle) et مخمر الملفوف (en arabe) comme le sont les olives de table?, b)-« Qu'apportent de particulier les choux verts à la santé humaine ?» et c)- Qu'apportent de particulier les choucroutes (les choux fermentés) à la santé humaine ?

L'enquête a été réalisée au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou. Le choix des enquêtés était fait au hasard parmi la population adulte (≥ 18 ans) et inclut des hommes et des femmes de toutes les catégories sociales en termes du niveau d'instruction.

II. Matériel végétale (Chou)

Le matériel végétal utilisé pour la préparation de la choucroute consiste principalement en du chou vert (*Brassica oleracea* var. *capitata*) (Figure 5). Ce chou a été acheté sur le marché local de Tizi Ouzou durant la période allant du 18/02/2025 au 27/03/2025. Les échantillons d'un poids total d'environ 12 kg ont été entreposés dans un réfrigérateur à 4°C jusqu'à analyse.



Figure 5 : Photographie de la variété de chou utilisée

III. Préparation de la choucroute

L'expérience de lactofermentation du chou vert a été réalisée selon la méthode décrite par **Thakur et Kabir (2015)** les mois de février et mars 2025. La procédure comprend les étapes suivantes (figure 8) :

- **Matière première** : 12 kg de chou ont été achetés au marché local de la ville de Tizi-Ouzou.
- **Triage** : Les têtes de chou ont été sélectionnées selon leurs bons états de fraîcheur. Les feuilles extérieures abîmées ont été enlevées, y compris tous les tissus meurtris, souillés et les parties dures (le cœur central).
- **Découpage** : Les feuilles de choux a ensuite été découpées en fines lamelles d'environ 4 × 2 mm à l'aide d'un couteau propre.
- **Salage** : Une quantité de 1 200 g de chou ainsi émincée a été mélangée avec 30,77 g de sel non iodé (2,5 %).
- **Malaxage manuelle** : Le sel a été soigneusement mélangé aux lamelles de chou pour permettre la répartition homogène du sel et favoriser la libération du jus (Figure 6).
- **Mise en bocaux** : les lanières de chou, préalablement pesées (130g par bocal) ont été placées dans des bocaux stériles, puis étalées et tassées. Elles ont ensuite été recouvertes d'une feuille de chou sur laquelle a été déposé un poids afin de favoriser l'immersion de la choucroute dans son jus ce qui à son tour facilite l'élimination de l'air. Les bocaux ont été fermés avec des couvercles (Figure 7).
- **Stockage et fermentation anaérobie** : Les bocaux ont été placés dans un endroit sec à l'abri de la lumière à température ambiante afin de permettre une fermentation spontanée.

Notons que la fin du processus de fermentation est déterminée lorsque le pH atteint la valeur de 3,5 (**Montaño et al., 2016**).



Figure 6 : Photographie du mélange des lanières de chou avec le sel



Figure 7 : Photographie de la mise en bocaux des choux

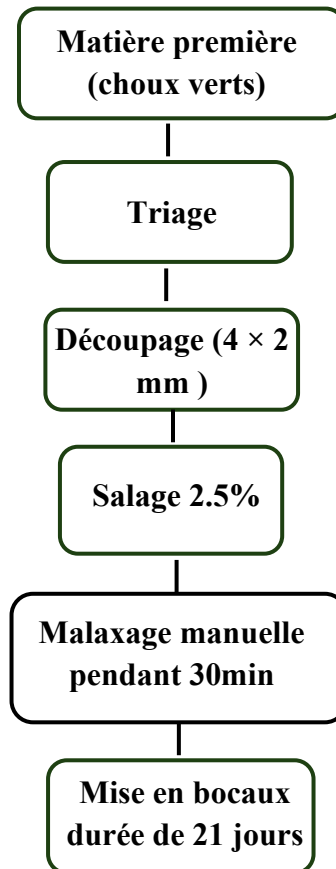


Figure 8 : Préparation des choucroutes

Au cours du processus de fermentation, d'une durée totale de 21 jours, l'évolution de la température et de l'humidité a été mesurée cinq fois par jour à 5h, 9h, 12h, 16h et 22h à l'aide d'un hygromètre. Par ailleurs, des analyses physico-chimiques ont été réalisées tous les 3 à 4 jours afin d'évaluer le pH, l'acidité, le °Brix et la teneur en vitamine C.

IV. Etude des caractéristiques physicochimiques

IV.1. Acidité active (pH) (NF V05-108, 1970)

L'acidité active consiste en la mesure de la concentration en ions hydrogènes (H⁺). L'expression des résultats se fait par lecture direct de la valeur de pH indiqué par le pH mètre. Mètre (inoLab Level 1).

IV.2. Teneur en extrait sec soluble (Brix)

On entend par résidu sec soluble déterminé par réfractomètre la concentration en saccharose d'une solution aqueuse ayant le même indice de réfraction que le produit analysé. Dans des conditions déterminées de préparation et de température, cette concentration est exprimée en pourcentage en masse.

La valeur de l'extrait sec soluble est la valeur lue par réfractomètre de type (ATC BT536010) qui nous donne l'indice réfraction

IV.3 Détermination de l'acidité titrable (NF V05-101, 1974)

Les acides sont extraits du produit trituré par chauffage avec l'eau à température de (80°C-90°C) pendant 30 mn. Les acides sont titrés par une solution de soude. La teneur totale en acides est calculée d'après l'acide organique dominant.

Un échantillon de 10 g de chou broyé est pesé puis introduit dans une fiole jaugée de 100 ml contenant de l'eau chaude. Le mélange est laissé au repos pendant 30 minutes avec agitation périodique. Après refroidissement, la fiole est complétée avec de l'eau distillée, puis le contenu est filtré.

Un volume de 10 ml de filtrat est ensuite prélevé. Après l'ajout de 2 à 3 gouttes de phénolphthaléine comme indicateur, le filtrat est titré avec une solution de NaOH 0,1 N jusqu'à l'apparition d'une coloration rose persistante pendant au moins 30 secondes.

La teneur X (en %) en acidité est exprimée, par la formule suivante :

$$X=100 \text{ VCMV}0 / (1000 \text{ mV}1)$$

V : volume de la solution de NaOH dépensé pour le titrage, en ml ;

C : concentration molaire de la solution de NaOH, en mol/l ;

M : masse molaire équivalente de l'acide organique, en g/mol ;

V0 : volume total de l'extrait (volume de la fiole de mesure), en ml ;

M : prise d'essai, en g

V1 : volume de l'extrait pris pour le titrage, en ml.

IV.4. Dosage de la Vitamine C

Il s'agit d'une réduction quantitative du 2,6-dichlorophénolindophénol (DPIP) en un leuco dérivé par la forme réduite de l'acide ascorbique (**Tilman cité par Audigie, 1978**).

IV.4.1. Dosage dans la solution étalon

Dans un Erlenmeyer de 150 ml, 10 ml de la solution étalon ainsi que 1 ml d'acide acétique à N/20 sont introduits. Le mélange est ensuite titré à l'aide de la solution préparée de DPIP (2-6 dichlorophénol indophénol) jusqu'à l'apparition d'une coloration rose pâle persistante pendant 30 secondes. Le volume de DPIP utilisé pour le titrage est noté **V₁**.

IV.4.2. Dosage dans l'échantillon

Une quantité de 10 g du produit est pesée à l'aide d'une balance analytique, puis broyée dans un mortier en présence d'une solution d'acide oxalique. Le broyat est ensuite transféré dans une éprouvette graduée de 50 ou 100 ml et complété avec la même solution d'acide oxalique. Après filtration ou centrifugation, un volume de 10 ml de filtrat est prélevé à l'aide d'une pipette et introduit dans un Erlenmeyer de 150 ml. À ce volume, 1 ml d'acide acétique est ajouté, puis le mélange est titré à l'aide de la solution de DPIP, selon la méthode décrite précédemment. Le volume de DPIP nécessaire au titrage est noté V_2 .

La masse de l'acide ascorbique X, exprimée en mg/100 g de produit, est donnée par la formule suivante :

$$X = (0,4 \times V_2 \times V / V_1 \times 10 \times m) \times 100$$

V_1 : volume de DPIP déterminé (ml)

V_2 : volume de DPIP déterminé (ml)

V : volume total du broyat (ml)

m : Masse exacte du produit (g)

IV.5. Analyses de l'acide lactique par chromatographie sur couche mince (CCM)

Cette méthode repose sur l'analyse qualitative des acides organiques, plus particulièrement de l'acide lactique, qui constitue le principal produit de la lactofermentation du chou. L'analyse est effectuée sur des échantillons de choucroute prélevés après 18 et 21 jours de la fermentation.

La CCM est réalisée selon la méthode décrite par **Sherma (2004)**. Une plaque de silice est utilisée comme support. Une ligne de départ est tracée au crayon à 2 cm du bord inférieur de la plaque, et une seconde ligne est tracée à 20 cm du bord supérieur pour indiquer le front d'élution. Entre ces deux repères, plusieurs points équidistants (espacés de 1,5 à 2 cm) sont marqués afin de définir les emplacements des dépôts.

Trente minutes avant le démarrage de la chromatographie, environ 1 cm de solvant organique est versé dans la cuve afin de saturer l'atmosphère interne en vapeurs de solvant. À l'aide d'une micropipette, cinq microgouttes superposées des solutions étalon et de l'échantillon à analyser sont déposées successivement sur les repères. Chaque goutte est séchée à l'aide d'un séchoir avant l'application de la suivante, afin d'éviter la diffusion du dépôt.

Une fois les dépôts effectués, la plaque est introduite verticalement dans la cuve chromatographique sans immerger la ligne de départ. La cuve est ensuite immédiatement refermée. La migration est arrêtée lorsque le solvant atteint le front d'élution préalablement marqué. La plaque est ensuite retirée, séchée à l'air libre, puis pulvérisée uniformément avec une solution de bleu de bromophénol pour révéler les composés organiques présents, notamment l'acide lactique.

Après révélation à l'aide du bleu de bromophénol, les taches correspondant aux acides organiques apparaissent sous forme de zones colorées. L'identification de l'acide lactique est réalisée par comparaison des distances de migration des échantillons avec celles des solutions étalon. Les distances sont mesurées du point d'origine (ligne de départ) jusqu'au centre de chaque tache révélée.

Le rapport frontal (**Rf**) de chaque composé est calculé selon la formule suivante :

$$Rf = di / ds$$

di : distance parcourue par le composé, en mm ;

ds : distance parcourue par le front de solvant, en mm.

Les valeurs de Rf obtenues sont comparées à celles des témoins standards d'acide lactique et de yaourt, ce qui permet de confirmer qualitativement la présence de ce composé dans les échantillons de choucroute analysés.

V. Analyses chimiques complémentaires

V.1.Extraction

L'extraction des composés bioactifs a été réalisée par macération, conformément au protocole décrit par **Chiang et al. (1994)**. Une quantité prélevée de matière végétale a été finement broyée à l'aide d'un mortier, puis 10 g de la masse homogénéisée ont été introduits dans 100 ml d'un mélange éthanol/eau (70:30, v/v). L'ensemble a été soumis à une agitation continue pendant 2 heures à température ambiante. Le mélange a ensuite été filtré, et les extraits éthanoliques obtenus ont été collectés dans des flacons hermétiquement fermés, puis conservés à 4 °C jusqu'aux analyses ultérieures.

V.2. Dosage des polyphénols totaux

Le dosage des polyphénols est réalisé selon la méthode décrite par (**Juntachote et al., 2006**). Les polyphénols présents dans un extrait réagissent avec le réactif de Folin-Ciocalteu, un mélange d'acide phosphomolybdique et phosphotungstique. En milieu alcalin, les polyphénols réduisent ces composés en formant un complexe bleu mesurable par spectrophotométrie. L'intensité de la coloration bleue est proportionnelle à la concentration en composés phénoliques.

V.2.1. Préparation de la gamme d'étalonnage

200 mg d'acide gallique sont dissous dans 100 ml d'éthanol pour obtenir une solution mère à une concentration de 2 mg/ml. Des dilutions successives sont ensuite réalisées à partir de la solution mère : S/8, S/16, S/32, S/64, S/128 et S/256 (Tableau V) , en prélevant 5 ml de la dilution précédente avec 5 ml d'eau distillée.

V.2.2. Détermination de la teneur en polyphénols dans les différents échantillons

0,5 ml de chaque dilution d'échantillon est placé dans un tube, suivi de 5 ml d'eau distillée, 0,5 ml de réactif de Folin-Ciocalteu, après 3 minutes, on ajoute 0,5 ml de carbonate de sodium à 20 %. L'incubation se fait pendant une heure à température ambiante, à l'abri de la lumière.

Le blanc contient 5 ml d'eau distillée, 0,5 ml de Folin-Ciocalteu et 0,5 ml de carbonate de sodium et 0,5ml d'éthanol 70%. L'absorbance est lue à 760 nm et les concentrations sont calculées par référence à la courbe d'étalonnage.

Tableau V : Préparation des dilutions de l'acide gallique pour la réalisation de la courbe d'étalonnage

Dilution	S	S/2	S/4	S/8	S/16	S/32	S/64	S/128	S/256
Concentrations (mg /ml)	2	1	0.5	0.25	0.125	0.062	0.031	0.015	0.007

V.3. Mesure de l'activité antioxydante

V.3.1. Mesure du pouvoir réducteur

L'activité antioxydante quantifié par le biais du pouvoir réducteur selon la procédure décrite par **Oyaizu (1986)**, indique l'aptitude des extrait à réduire le fer (Fe^{3+}) en fer (Fe^{2+}). Le mécanisme est connu comme étant un indicateur de l'activité donatrice d'électrons, caractéristique de l'action antioxydante des polyphénols (**Yildirim et al., 2001**).

Pour cela, une aliquote de 1 ml de chaque extrait est mélangée à 2,5 ml de tampon phosphate (0,2 M, pH 6,6) et 2,5 ml de solution aqueuse d'hexacyanoferrate de potassium [$\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$] à 1 %. Après une incubation de 30 minutes à 50 °C, on ajoute 2,5 ml de solution d'acide trichloracétique à 10 %. Le mélange est ensuite centrifugé à 3000 g pendant 10 minutes (SIGMA 4-16K).

Un volume de 2,5 ml du surnageant est ensuite combiné avec 2,5 ml d'eau distillée et 0,5 ml de solution aqueuse de FeCl_3 à 0,1 %. L'absorbance est mesurée à 700 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (SHIMADZU UV-1900 i). Une absorbance élevée indique une forte activité antioxydante. Les résultats, obtenus en moyenne sur trois mesures, sont exprimés en équivalents d'acide ascorbique (mg eq. acide ascorbique / 100 g de matière fraîche).

Le mécanisme d'action peut être représenté comme suit :



Lorsqu'un antioxydant est présent, Fe^{3+} est réduit en Fe^{2+} , lequel réagit avec l'hexacyanoferrate de potassium $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ pour former un complexe bleu de Prusse ($\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$), ce qui provoque un changement de couleur visible. $\text{Fe}^{2+} + \text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] \rightarrow \text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 2\text{K}^+$

V.3.2. Mesure de l'activité anti-radicalaire au radical DPPH°

Le DPPH°, un composé radicalaire stable 2-2-diphényl 1-picryl-hydrazil, est largement utilisé pour évaluer rapidement et directement l'activité antioxydante en raison de sa stabilité en tant que radical libre et de la simplicité de son analyse. Il a une absorption dans le visible à une longueur d'onde de 517 nm et se présente sous forme de violet foncé. En présence de composés anti radicalaire, il est réduit pour prendre une couleur jaune (forme réduite) (Molyneux, 2004).

Une solution de DPPH à 0,004% a été préalablement préparée dans de l'éthanol. Trois types de tubes ont été mis en place : un tube témoin contenant 1 ml de solution de DPPH et 1 ml d'éthanol, un tube blanc contenant 2 ml d'éthanol pour l'étalonnage du spectrophotomètre, et des tubes d'échantillons contenant chacun 1 ml d'extrait éthanolique et 1 ml de solution de DPPH. Les mélanges ont été incubés à l'obscurité pendant 30 minutes à température ambiante. L'absorbance a ensuite été mesurée à 517 nm.

Le calcul du pourcentage d'inhibition (PI) du radical DPPH est fait selon la formule suivante :

$$PI (\%) = [(Ac - Ae)/Ac] \times 100$$

Ac : Absorbance du contrôle

Ae : Absorbance de l'extrait

VI. Etude statistique.

Les résultats concernant la caractérisation physicochimique ont été exprimés sous forme de moyenne \pm écart type ($n = 3$). Pour l'analyse statistique plus approfondie des données obtenues, nous avons en plus adopté la procédure décrite par **Bourebria et Yachir (2024)** à propos de l'acidité d'huile d'olive provenant de différentes localités de la wilaya de Tizi-Ouzou. Tenant compte de l'intérêt et de l'originalité de la procédure, nous avons jugé utile de reproduire cette dernière intégralement.

Cette étude concerne l'application des boîtes à moustaches pour l'analyse statistique des valeurs obtenues lors du suivi de la température, de l'humidité relative de l'air, du pH et du °Brix.

La boîte à moustaches (en anglais *Box et Whiskers Plot*), est une invention de **TUKEY (1977)** pour représenter schématiquement la distribution d'une variable. Cette représentation graphique est généralement utilisée pour comparer des séries statistiques ayant des effectifs différents (**Guen, 2001**).

La boîte à moustaches utilise 6 valeurs qui résument des données :

- le minimum (X_{\min}) = l'extrémité inférieure de la boîte à moustaches qui nous informe sur la valeur minimale de la série statistique étudiée,
- le 1^{er} quartile Q_1 = valeur du 1^{er} quartile Q_1 (25% des effectifs), correspondant au trait inférieur de la boîte,
- le 2^{ème} quartile Q_2 (médiane, Me) = valeur du 2^{ème} quartile Q_2 (50% des effectifs), représentée par un trait horizontal à l'intérieur de la boîte,
- le 3^{ème} quartile Q_3 = valeur du 3^{ème} quartile Q_3 (75% des effectifs), correspondant au trait supérieur de la boîte,
- la moyenne (moy) = moyenne, indiquée parfois par un point ou une croix sur la boîte à moustaches,
- le maximum (X_{\max}) = l'extrémité supérieure de la boîte à moustaches qui nous informe sur la valeur maximale de la série statistique étudiée,

A ces 6 paramètres on peut ajouter d'autres caractéristiques comme l'écart interquartile qui est une mesure de la dispersion et qui est défini comme suit :

$$\text{Ecart Interquartile} = Q_3 - Q_1$$

La mesure de la dispersion est définie par certains auteurs par la formule suivante :

$$\text{Dispersion (\%)} = 100 * (Q_3 - Q_1) / \text{Médiane}$$

Une dispersion de moins de 30% est concédée comme acceptable.

Les deux « moustaches » inférieure et supérieure montrées dans la figure 9 par des traits verticaux de part et d'autre de la boîte, représentent les intervalles des 25% inférieur et supérieur des valeurs des données, sont considérés des valeurs aberrantes.

Les valeurs dites extrêmes (atypiques, exceptionnelles, aberrantes...) situées au-delà des valeurs adjacentes sont individualisées. Elles sont représentées par des marqueurs (carré, ou étoile, etc.).

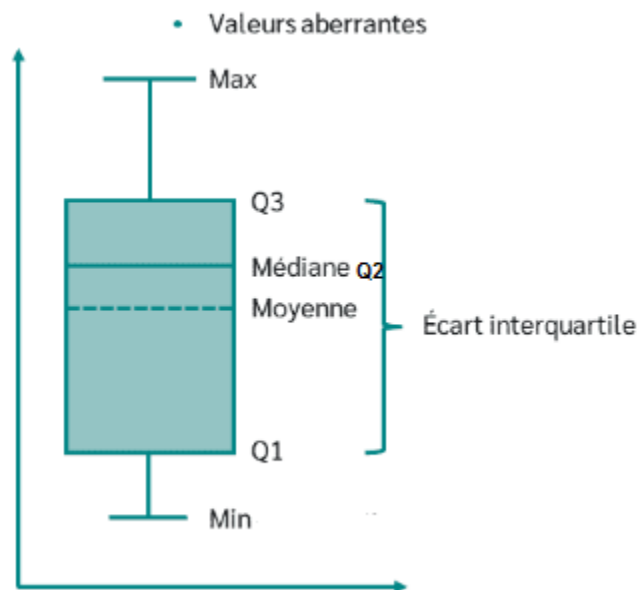


Figure 9 : Représentation graphique de la boîte à moustache.

Le logiciel **XLSTAT** a été utilisé pour l'analyse de la variance (**ANOVA**) au seuil de signification $p = 0,05$ ainsi que pour la représentation statistique de la distribution des variables considérées.

VII. Analyses microbiologiques

Les analyses microbiologiques ont été réalisées sur le produit fermenté final, après 18 jours de fermentation. L'objectif est de déterminer la qualité microbiologique de la choucroute à la fin du processus.

VII.1. Recherche et dénombrement des différents microorganismes

La recherche et le dénombrement des bactéries effectués sont essentiels pour vérifier l'aptitude et la conformité du produit final, dans la mesure où la sécurité hygiénique ainsi que la qualité organoleptique dépendent étroitement de la flore microbienne présente (Sornoza, 2024).

Pour la préparation des dilutions décimales, 1 ml de jus de choucroute préalablement broyé est transféré dans un tube contenant 9 ml d'eau physiologique stérile, afin d'obtenir une première dilution au 1/10. Cette opération est ensuite répétée en transférant 1 ml de la dilution précédente dans un nouveau tube contenant également 9 ml d'eau physiologique, et ainsi de suite, afin d'obtenir les dilutions décimales successives. Les dilutions appropriées sont ensuite ensemencées sur différents milieux de culture sélectifs, soit en profondeur, soit en surface, selon la méthode utilisée (Ben-david et al., 2014).

VII.1.1. Recherche et dénombrement de la flore totale mésophile

Le dénombrement de la flore aérobie mésophile est réalisé sur le milieu PCA (Plate Count Agar), par ensemencement en masse. Les colonies apparaissent diverses en taille et en morphologie, car cette flore est très hétérogène. L'incubation se fait à 30 °C pendant 48 heures (ISO 4833, 1991).

VII.1.2. Recherche et dénombrement des levures et moisissures

Le dénombrement des levures et moisissures se fait par ensemencement en surface sur milieu OGA (Oxytetracycline Glucose Agar) un milieu sélectif contenant de l'oxytétracycline qui inhibe la croissance bactérienne, favorisant ainsi la croissance des champignons microscopiques. L'incubation se fait après à 28 °C pendant 5 jours, les colonies de levures apparaissent lisses, crémeuses, tandis que celles des moisissures sont opaque, filamenteuse avec un aspect duveteux (Mossel et al., 1970).

VII.1.3. Recherches et dénombrement des Coliformes

L'isolement et le dénombrement des coliformes totaux et fécaux se font sur le milieu VRBL (Violet Red Bile Lactose Agar), par ensemencement en surface. Les colonies typiques sont rouges à rosées avec un halo précipité dû à la fermentation du lactose et à la précipitation des sels biliaires. L'incubation se fait à 37 °C pour les coliformes totaux, et à 44 ± 0,5 °C pour les coliformes fécaux, pendant 24 à 48 heures (Ueda, 1965).

VII.1.4. Recherche et dénombrement des *Staphylococcus aureus*

L'isolement et le dénombrement de *staphylococcus aureus* se font sur milieu Baird-Parker. Les colonies observées dans les boîtes de Pétri sont de couleur noire, en raison de la réduction du tellurite de potassium. Elles sont entourées d'un halo clair, dû à l'hydrolyse de la lécithine contenue dans le jaune d'œuf ajouté au milieu, par l'action de la lécithinase produite par la bactérie. La lecture se fait après incubation à 37°C pendant 24 à 48 heures (ISO, 2021).

VII.1.5. Recherche des *Salmonella*

L'isolement des *salmonellas pp.* suit une méthode en plusieurs étapes. Un pré-enrichissement est d'abord effectué dans l'eau peptonée tamponnée, incubée à 37 °C pendant 18 heures, afin de permettre la récupération des cellules lésées. Ensuite, un ensemencement est réalisé dans le bouillon sélectif Rappaport-Vassiliadis (RV), suivi d'une incubation à 41 °C pendant 24 heures. Après cette étape, un isolement en surface est effectué sur le milieu Hektoen (HE) et incubé à 37°C pendant 24 heures. Les colonies typiques de *Salmonella* apparaissent vertes à centre noir, dues à la non fermentation des sucres présents dans le milieu et à la production d'hydrogène sulfuré (H₂S) (Mast, 2020).

VII.1.6. Recherche et dénombrement de la flore lactique

VII.1.6.1. *Streptococcus*

L'isolement et le dénombrement des bactéries lactiques mésophiles du genre *streptococcus* se font sur le milieu M17 agar, par ensemencement en double (en masse et en surface). Les colonies apparaissent petites, rondes, blanches à crème. L'incubation se fait à 37 °C pendant 48 heures en anaérobiose (Sule et al., 2014).

VII.1.6.2. *Lactobacillus*

L'isolement des bactéries lactiques du genre *lactobacillus* se fait sur le milieu MRS (Man, Rogosa, Sharpe), par ensemencement en double (en masse et en surface). Les colonies sont petites, opaques, blanches à crème. L'incubation s'effectue à 37 °C pendant 72 heures en anaérobiose. Le milieu MRS est acide, ce qui favorise la croissance sélective des bacilles lactiques (Sule et al., 2014).

VII.2. Etude macroscopique et microscopique des bactéries lactiques

VII.2.1. Etude macroscopique

Elle consiste en l'étude des colonies des bactéries lactiques à l'œil nu ou sous une loupe binoculaire pour déterminer les critères caractérisant les colonies (Barcella et al., 2016).

VII.2.2. Etude microscopique

L'observation microscopique permet de caractériser la morphologie ainsi que certaines structures cellulaires spécifiques. Elle peut être réalisée sur des échantillons frais (vivants), permettant une visualisation en conditions naturelles, ou sur des échantillons ayant subi une coloration, afin d'améliorer le contraste et de faciliter l'identification des composants cellulaires.

La coloration de Gram est une méthode différentielle permettant de distinguer les bactéries à Gram positif des bactéries à Gram négatif, en se basant sur la structure de leur paroi cellulaire.

Pour effectuer cette coloration, un frottis est réalisé en étalant une petite quantité de colonie bactérienne sur une lame de verre, à laquelle on ajoute une goutte d'eau, puis on homogénéise. Après séchage à la flamme sans brûler la préparation, la lame est recouverte de violet de gentiane pendant 1 minute, afin de permettre une bonne fixation du colorant primaire. Cette étape est suivie par l'application du Lugol pendant 40 secondes. La décoloration est ensuite effectuée par immersion rapide dans un bain d'alcool pendant environ 30 secondes, puis la lame est rincée à l'eau distillée. Une contre-coloration est ensuite réalisée à la fuchsine pendant 1 minute, suivie d'un nouveau rinçage à l'eau distillée. La lame est enfin observée au microscope optique à différents grossissements (10x, 40x, puis 100x à l'huile à immersion) (Coico, 2005).

VII.2.3. Test de la catalase

La catalase est une enzyme respiratoire qui catalyse la décomposition du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) en eau (H_2O) et en oxygène (O_2), un composé toxique pour certaines bactéries (Chaudhari et al., 2013).

Le test consiste à mettre en contact sur une lame une goutte d'eau oxygénée avec un fragment d'une colonie bactérienne, si on observe après quelques minutes de frottement un dégagement gazeux sous forme de bulle : catalase (+) ; s'il y'a absence de bulles : catalase (-).

VII. Évaluation sensorielle hédonique

Pour évaluer l'acceptabilité générale de la choucroute élaborée, un test de dégustation de type hédonique rapportée par Sauvageot (1990) a été réalisé auprès d'un panel d'étudiants de l'université Mouloud Mammeri, de Tizi-Ouzou. Ce test consistait à faire goûter la choucroute à des participants non entraînés afin de recueillir leur perception globale du produit. L'évaluation s'est faite à l'aide d'une échelle hédonique à 9 points, allant de 1 (extrêmement désagréable) à 9 (extrêmement agréable) (Annexe 8).

CHAPITRE II :
Résultats et discussion

I. Mini enquête d'opinion sur la consommation de la choucroute à Tizi-Ouzou

Les résultats de l'enquête menée auprès de 52 personnes sont rassemblés dans la figure 9.

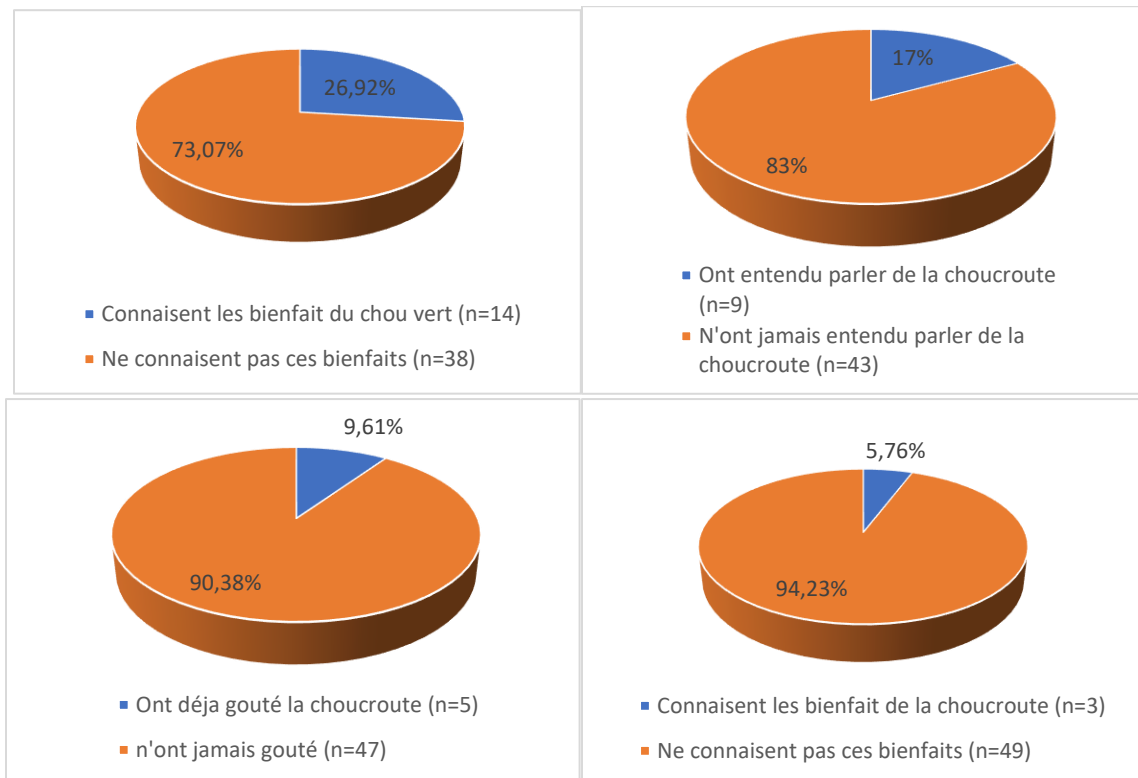


Figure 10 : Perception du chou et la choucroute dans la population interrogée

L'analyse du questionnaire (Annexe9) menée auprès de 52 participants de la wilaya de Tizi-Ouzou a révélé qu'une grande majorité des personnes interrogées ne connaît ni la choucroute ni ses bienfaits sur la santé (caractère fonctionnel) (Figure10),

Les données recueillies indiquent que 83 % des répondants n'ont jamais entendu parler de la choucroute, tandis que 90,38 % ne l'ont jamais goûtée. En outre, 30 % seulement des personnes interrogées connaissent les bienfaits du chou vert sur la santé humaine, contre 5 % pour la choucroute. Ces résultats soulignent un déficit notable de vulgarisation des propriétés nutritionnelles du chou vert lactofermenté ou non. Globalement ce résultat ne concorde pas avec celui communiqué par Šikić-Pogačar et al. (2022) puisque ces auteurs soulignent que 62,2 % des participants intégrés dans cette étude étaient conscients des bienfaits des aliments fermentés pour la santé, principalement en ce qui concerne la santé gastro-intestinale et le système

Immunitaire. L'étude en question a été conçue pour fournir des données sur la sensibilisation et l'utilisation des aliments fermentés au sein la population du nord-est de la Slovénie.

II. Suivi des conditions expérimentales

II.1. Température

La variation de la température en fonction du temps est montrée dans la figure 11.

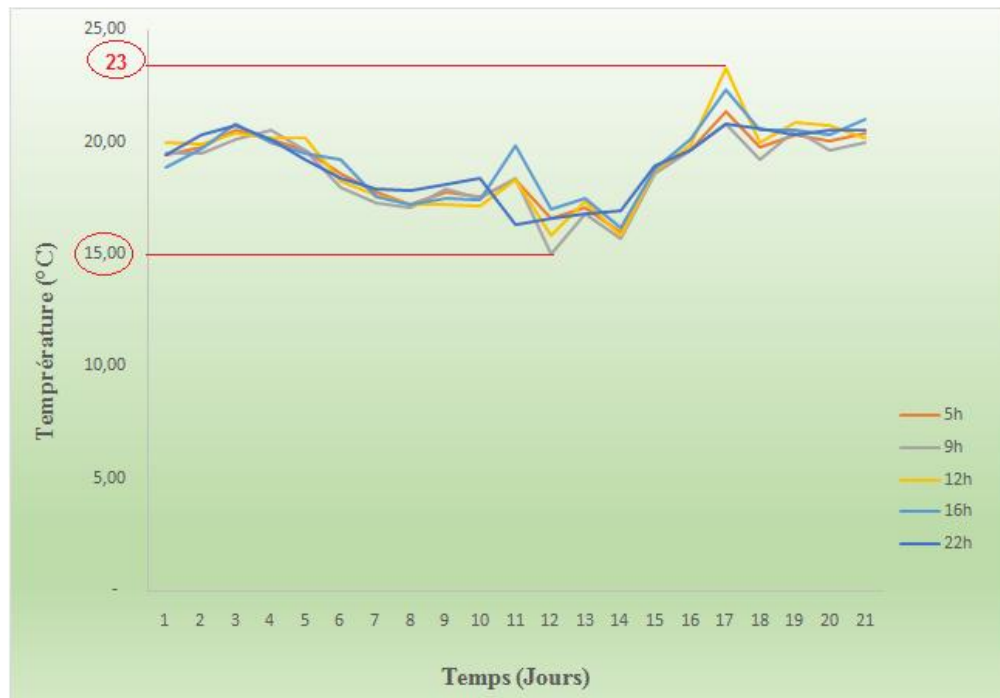


Figure 11 Variation de la température en fonction du temps : Période d'observation allant du 15 / 04 au 05 / 05 /2025.

La température ambiante enregistrée durant le processus de fermentation s'est généralement maintenue entre 15°C et 23 °C. Une image complète de la distribution des températures durant toute la durée de la lactofermentation est donnée par la boîte à moustache dans l'annexe 6.

Dans le cadre d'une fermentation spontanée, où aucun contrôle des conditions n'est appliqué, la température joue un rôle déterminant dans le succès du processus. Elle influence directement la croissance et l'activité des bactéries lactiques (BL), principales responsables de la

Production d'acide lactique. En général, les BL sont capables de se développer dans une plage de température allant de 10 °C à 45 °C (**Barinov, 2011**).

Pour rendre compte de l'influence de la température sur la vitesse d'une transformation physicochimique quelconque comme dans notre cas la formation de l'acide lactique par exemple :

$$k_{T+10^{\circ}\text{C}} / k_T = \gamma \implies k_{T+10^{\circ}\text{C}} = \gamma \times k_T$$

Où :

k_T est la vitesse (ou constante) de réaction à la température quelconque T,

$k_{T+10^{\circ}\text{C}}$ est la vitesse (ou constante) de réaction à la température T+10°C,

γ est le coefficient de température.

$$k_{T+20^{\circ}\text{C}} / k_{T+10^{\circ}\text{C}} = \gamma \implies k_{T+20^{\circ}\text{C}} = \gamma \times k_{T+10^{\circ}\text{C}} = \gamma^2 \times k_T$$

$$k_{T+30^{\circ}\text{C}} / k_{T+20^{\circ}\text{C}} = \gamma \implies k_{T+30^{\circ}\text{C}} = \gamma \times k_{T+20^{\circ}\text{C}} = \gamma^3 \times k_T$$

$$k_{T+n10} = \gamma^n \times k_T$$

$\gamma \sim 2$ environ d'après la théorie

$$\text{Exemple : } k_{15} = 2 \text{ et } k_{23} = ? \implies T + n10 = 23$$

$$\text{Ou } 15 + n10 = 23$$

$$n = 23-15/10 = 0,8 \implies k_{23} = 2^{0,8} \times k_{15} = 1,7 \times k_{15}$$

D'après l'étude menée par (**Thakur et al., 2017**) sur l'influence de la température sur la fermentation lactique de la choucroute, la plage comprise entre 15°C-20°C était la plus efficace avec les meilleures caractéristiques physicochimiques marquées par une forte acidité et des teneurs élevées en acide lactique et la vitamine C, traduisant une activité fermentaire efficace.

II.2. Humidité

La variation de l'humidité relative de l'air en fonction du temps est montrée dans la figure 12.

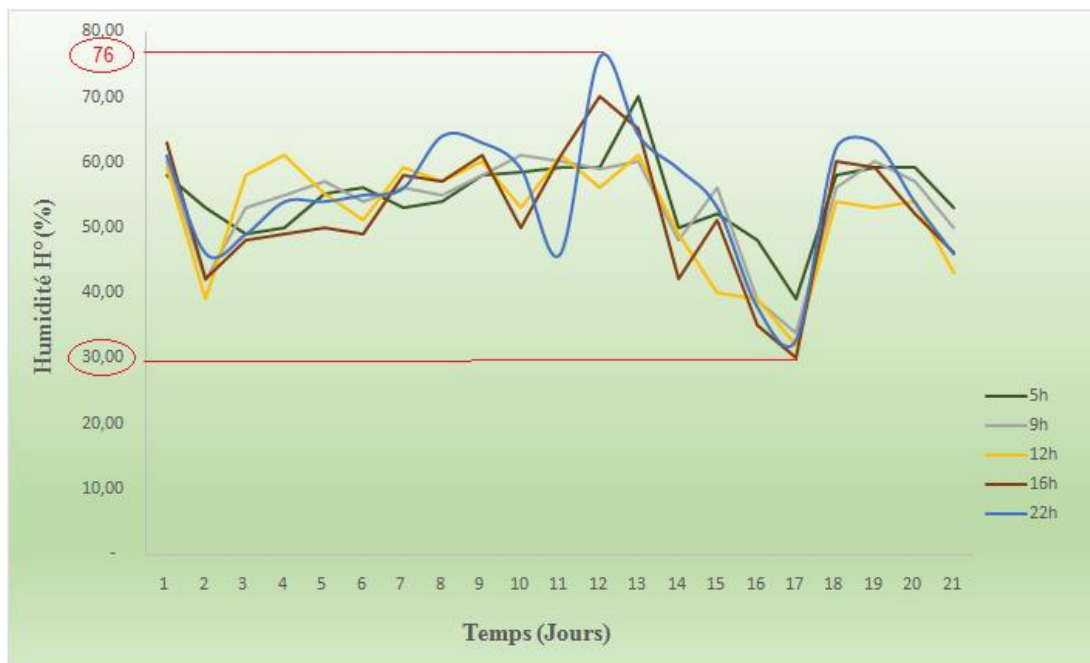


Figure 12 : Variation de l'humidité relative de l'air en fonction du temps : Période d'observation allant du 15 / 04 au 05 / 05 /2025.

Une variabilité notable de l'humidité est marquée au cours des 21 jours de fermentation, se manifestant par une baisse importante au jour 17, atteignant les 30 % d'humidité et un maximum de 76%. Ces variations peuvent influencer le métabolisme des bactéries lactiques, car une humidité trop basse peut ralentir la fermentation. Les taux d'humidité les plus élevées sont celles prises à 22h, tandis que les taux les plus bas sont enregistrés aux alentours de 16h.

Notons que contrairement à la température, l'humidité relative de l'air n'est pas, à notre connaissance, prise en compte dans les études sur la préparation des choucroutes. A ce propos, **Sionek et al. (2024)** ont mentionné l'humidité relative comme facteur pouvant supporter ou réduire la durée de vie des lactobactéries.

III. Caractérisation physico-chimique

III.1. Evolution de quelques paramètres physicochimiques au cours du processus de fermentation

La variation du pH lors de la fermentation est présentée par la courbe de la figure 13.

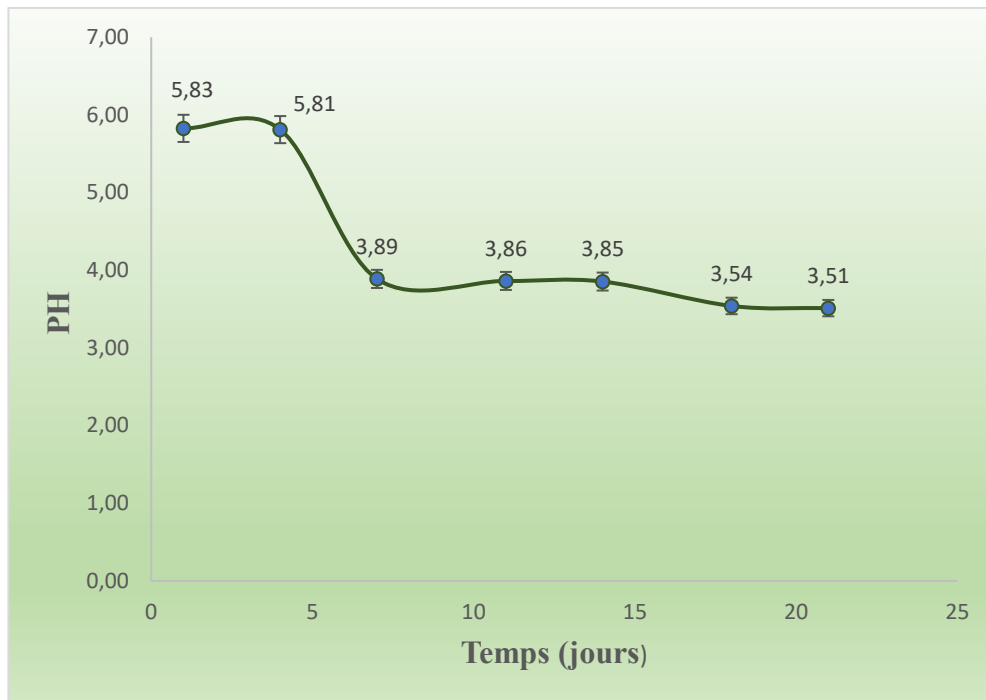


Figure 13 : Evolution du pH au cours de la fermentation

Dès les premiers jours de fermentation, une diminution progressive du pH est observée, témoignant de l'activité métabolique des bactéries lactiques. Le pH passe de 5,83 au jour 1 à 3,51 au 21^e jour, traduisant une acidification marquée du milieu. Cette évolution est similaire à celle rapportée par **Thakur et al. (2017)**. Ces auteurs ont également obtenu une baisse du pH allant de 5,48 à 3,49 en 21 jours de fermentation à des températures comprises entre 15°C-20°C.

L'analyse statistique à travers la boîte à moustaches (Annexe 5) révèle une moyenne de 4,56, représentant un indicateur global du niveau d'acidité atteint durant la fermentation. Cette valeur moyenne met en évidence le niveau d'acidification atteint dans le milieu au cours du processus fermentaire. Elle se situe entre les extrêmes mesurés (6,23 et 3,51), reflétant une chute significative mais progressive du pH sur l'ensemble de la période de fermentation.

La variation de l'acidité titrable au cours de la lactofermentation est représentée par la figure 14.

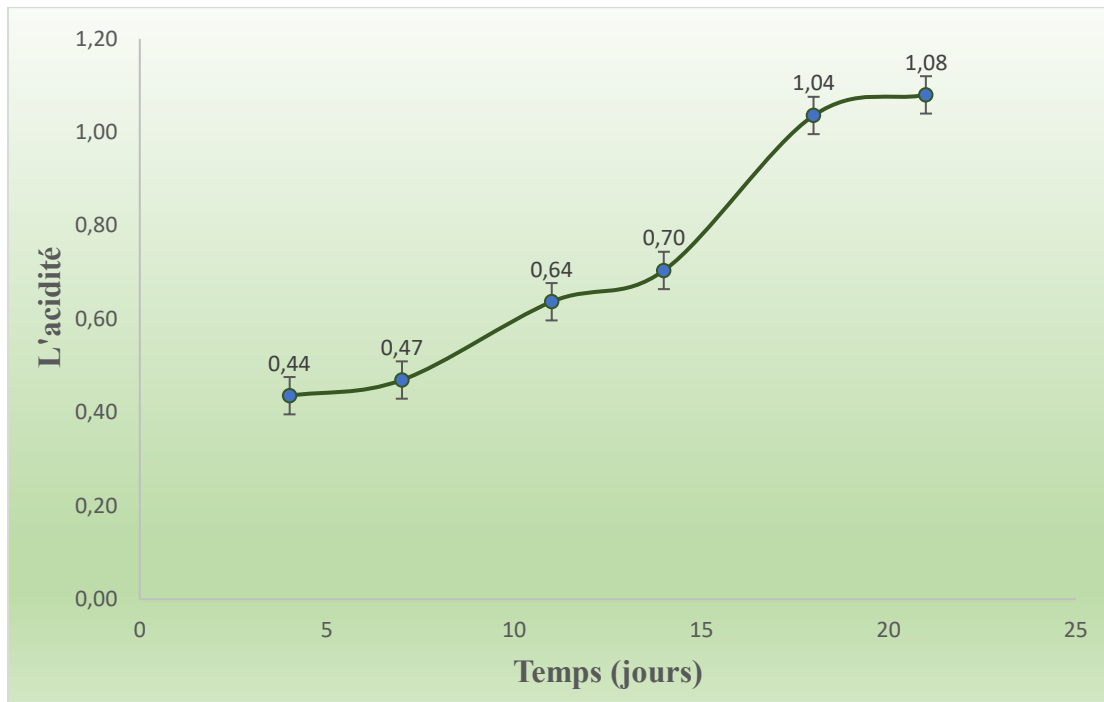


Figure 14 : Evolution du taux d'acidité titrable au cours de la fermentation.

Une augmentation progressive de l'acidité a été observée tout au long du processus fermentaire, allant de 0,42 % au jour 4, jusqu'à 1,11% au jour 21. Cette évolution reflète une acidification marquée du produit qui est d'environ 2,5 fois plus élevée vers la fin de fermentation (j21) par rapport à celle observée au jour 4, traduisant une synthèse importante de l'acide lactique, produit essentiel de la fermentation lactique.

Il existe une relation inverse bien établie entre le pH et l'acidité titrable au cours de la fermentation : à mesure que le pH diminue, l'acidité augmente graduellement. Ce phénomène reflète l'accumulation d'acides organiques, principalement l'acide lactique, produits par l'activité des bactéries lactiques (Satora et al., 2020).

L'évolution du °Brix durant le processus de fermentation spontanée est illustrée dans la figure 15.

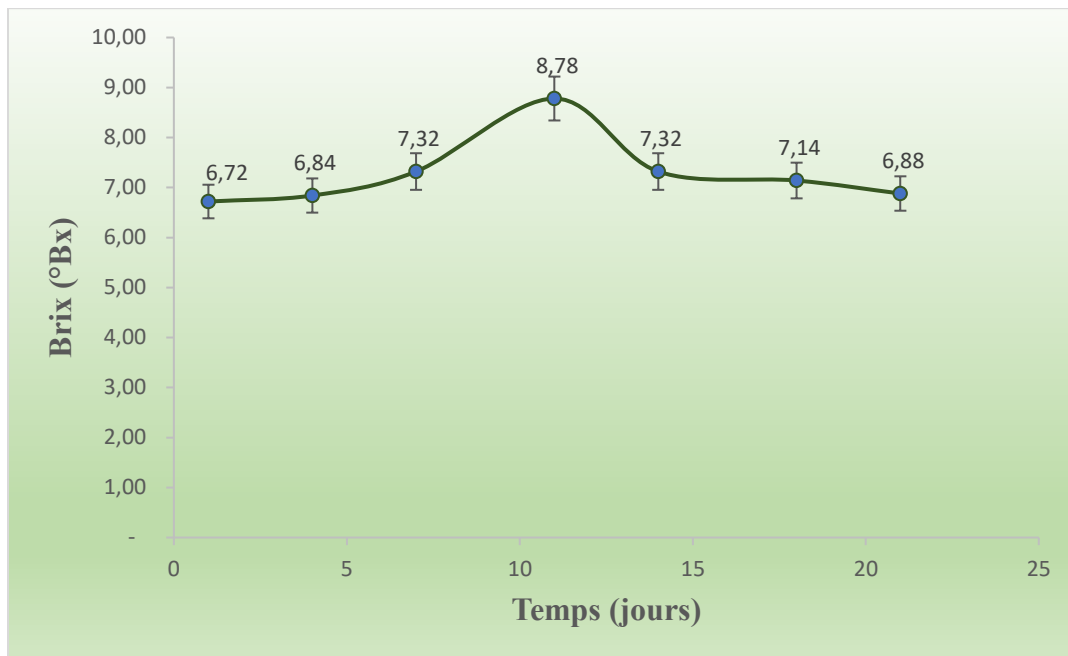


Figure 15 : Evolution du °Brix au cours de la fermentation

Au cours de la fermentation, le °Brix de la choucroute a enregistré une augmentation progressive, atteignant un pic de 8,78 °Brix au jour 11, avant de diminuer jusqu'à 6,88 °Brix au jour 21. Cette hausse initiale pourrait être attribuée à la libération des sucres intracellulaires due à la lyse cellulaire provoquée par le tranchage, ainsi qu'à la production d'exopolysaccharides (EPS) par les bactéries lactiques (**Park et al., 2012**). La baisse qui suit reflète l'utilisation de ces sucres par les bactéries lactiques pour la production d'acide lactique.

L'analyse statistique par boîte à moustaches (Annexe 4) montre une moyenne générale de 7,19 °Brix, ce qui reflète une valeur de référence globale de la teneur en sucres solubles au cours de la fermentation. L'étendue interquartile (6,8 à 7,5) reflète la stabilité relative du °Brix pendant la majeure partie du processus, suggérant que les fluctuations les plus marquées sont concentrées aux moments clés du métabolisme microbien.

La variation de la teneur en vitamine C dans la choucroute entière au cours de la lactofermentation est représentée par la figure 16.

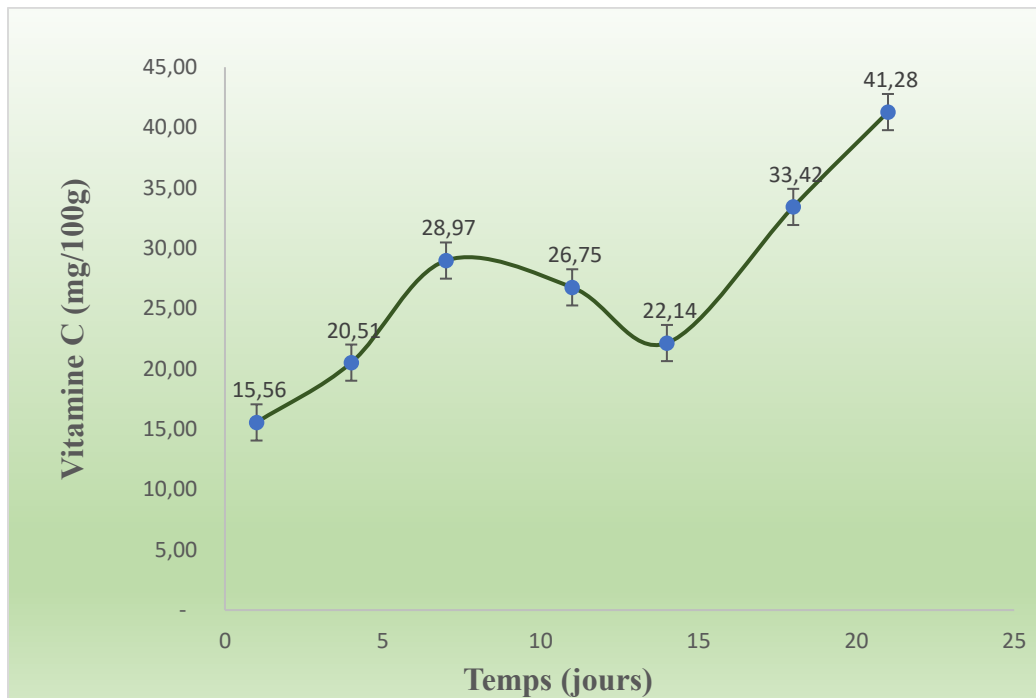


Figure 16 : Evolution du taux de vitamine C au cours de la fermentation.

La concentration initiale en vitamine C, correspondant à 15,56 mg/100 g au 1^{er} jour de fermentation, a connu une augmentation significative jusqu'au jour 7, atteignant une valeur de 28,97 mg/100 g . Entre le jour 11 et le jour 14, une légère diminution de la teneur en vitamine C a été observée (Figure 16). Cette baisse pourrait être liée à une variation des conditions climatiques durant cette période, susceptible d'avoir ralenti l'activité fermentaire, ces résultats suggérant que le processus fermentaire a un impact direct sur l'évolution de la teneur en vitamine C. Ces résultats sont concordants avec ceux communiqués par **Suleman et al. (2025)** à propos de différents légumes fermentés tels que le kimchi et les pickles. Ils ont montré que la teneur en vitamine C varie en fonction de plusieurs paramètres, notamment la concentration en sel, la température et la durée de fermentation.

La teneur en acide ascorbique continue de nouveau à augmenter à partir du jour 14, pour au finale atteindre un pic de 41,28 mg/100 g au jour 21, indiquant une relance de l'activité microbienne favorable à la synthèse de vitamine C. Ce résultat est proche de celui rapporté par **Ozer et Yildirim (2019)**, qui ont évalué les propriétés nutritionnelles et antioxydantes de produits fermentés à base de chou (chou mariné, choucroute, kimchi) et ont trouvé une teneur en vitamine C de 43,2 mg/100 g dans la choucroute contre 19 mg/100g dans les choux frais.

Par ailleurs, une étude menée par **Martinez et al. (2008)** a mis en évidence une variation notable de la teneur en vitamine C au cours d'une fermentation spontanée, avec des concentrations allant de 156,72 mg/100 g à 256,31 mg/100 g. Cette étude souligne une fois de plus l'influence directe du processus fermentaire sur la dynamique de la vitamine C.

Les résultats obtenus lors du suivi de l'évolution de la teneur en Vitamine C dans le jus de choucroute sont illustré par la figure 17.

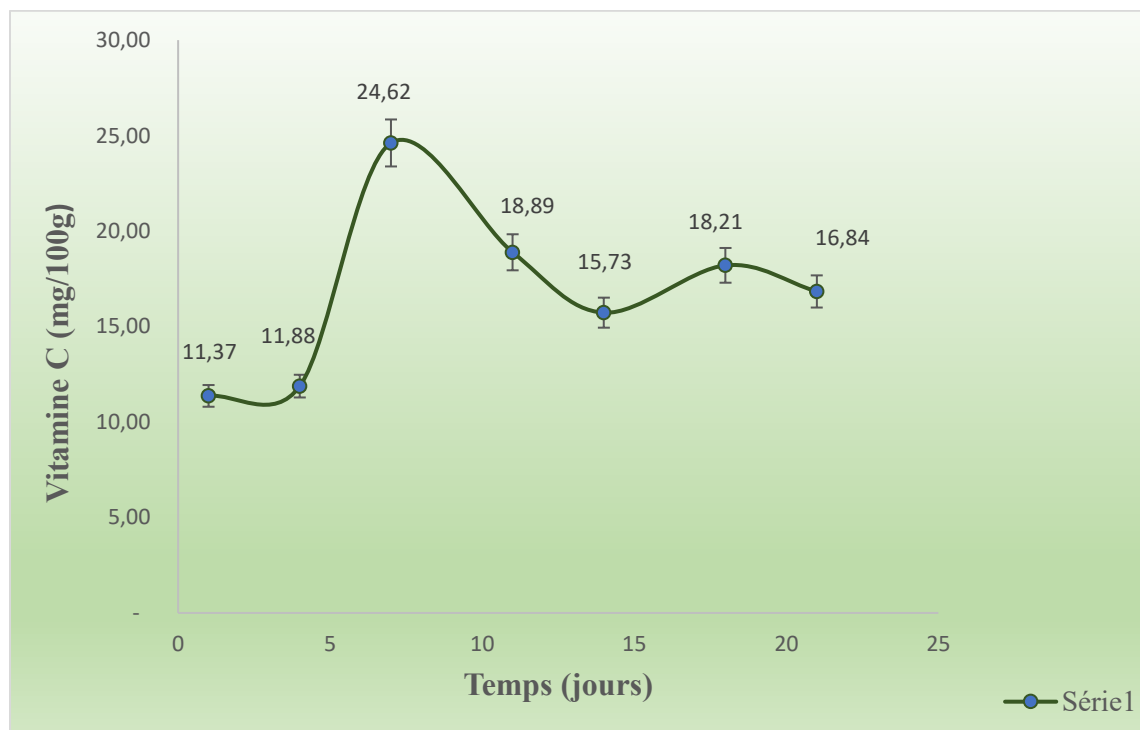


Figure 17 : Evolution du taux de vitamine C de la choucroute (phase liquide) au cours de la fermentation.

L'analyse du jus de choucroute a révélé des valeurs nettement plus faibles en vitamine C par rapport à la choucroute entière (Figure17). Cela peut s'expliquer par le fait que l'acide ascorbique est en grande partie retenu dans la matrice cellulaire du chou et n'est que partiellement libéré dans le liquide (jus de choucroute) au cours de la fermentation.

➤ Observation de la première fermentation

Une première fermentation a été initiée du 28 février au 8 mars 2025, à une température ambiante moyenne d'environ 19 °C. Cette tentative a été réalisée sans ajout de poids, ce qui a provoqué un défaut d'immersion du matériel végétal dans son propre jus. Bien que le milieu n'ait pas été exposé directement à l'air libre, l'absence d'immersion complète a compromis les conditions idéales de fermentation avec développement apparents des moisissures.

Les figures 18 et 19 ci-dessous illustrent, respectivement, la première tentative de fermentation réalisée sans ajout de poids, et la deuxième fermentation avec l'ajout d'un poids en verre.



Figure 18 : Fermentation spontanée sans ajout de poids



Figure 19 : Fermentation spontanée avec l'ajout d'un poids en verre

III.2. Caractéristiques physico-chimiques comparées du chou frais et de la choucroute obtenue aux 18^e et 21^e jours de fermentation.

Il est bien connu que la qualité du produit final est grandement influencée par la composition des matières premières. Les données relatives à la caractérisation de divers paramètres physico-chimiques sont présentées dans le tableau VI .

Tableau VI : Caractéristiques physico-chimiques du chou frais (Cf) et de la choucroute obtenue aux 18^e et 21^e jours de fermentation

Paramètres physico chimiques	Cf	Ch. j18	Ch. j21
TSS (°Brix)	6,56 ± 0,13 ^c	7,14 ± 0,05 ^a	6,88 ± 0,04 ^b
PH	6,23 ± 0,00 ^a	3,54 ± 0,00 ^b	3,51 ± 0,004 ^c
Acidité (%)	0,25 ± 0,04 ^b	1,05 ± 0,05 ^a	1,11 ± 0,05 ^a
Acide ascorbique (mg/100g) Ph L*	15,13 ± 0,44 ^c	18,21 ± 0,00 ^a	16,84 ± 0,15 ^b
Acide ascorbique (mg/100g) CE*	15,13 ± 0,44 ^c	33,42 ± 0,15 ^b	41,28 ± 0,26 ^a

CE* : Choucroute entière = Phase solide + Phase liquide

Ph L* : Phase liquide = Liquide de couverture=Jus cellulaire salé.

En comparant les paramètres physicochimiques du chou frais (Cf) et de la choucroute de tous les paramètres étudiés on remarque une différence significative dans les valeurs ($p \leq 0,05$). L'augmentation du °Brix dans la choucroute peut être attribuée à la libération des sucres intracellulaires due à la lyse cellulaire provoquée par le tranchage et l'addition de sel, ainsi qu'à la production d'exopolysaccharides (EPS) par les bactéries lactiques (**Park et al., 2012**). Une baisse notable entre le °Brix mesurer dans la Ch j18 et la Ch j21, indiquant que les sucres ont été consommés vers la fin de par les bactéries lactiques pour la synthèse de l'acide lactique.

En parallèle le pH a connu une forte baisse passant de 6,23 dans le Cf, une valeur qui est proche de celle apportée par **Begrache (2021)**, jusqu'à atteindre un pH final de 3.51 dans la Ch j21, soit un pH qui est 1,8 fois plus bas comparé au chou frais. En comparant le pH de la Ch j18 et celui de Ch j21 une légère baisse est observée au 21^{em} jour, (Tableau VI).

Cette baisse reste significative, traduisant une sensibilité du pH aux modifications physicochimiques complexes du milieu.

Inversement l'acidité titrable augmente, pour passer de 0,25% dans le Cf à 1.11% dans la Ch j21, soit une hausse significative de 4.4 fois plus élevée par rapport au chou frais. Cette acidification du produit est le résultat de la production d'acide lactique par les BL présentes dans le chou pommée.

Quant à la vitamine C, les résultats ont mis en évidence une différence significative entre la teneur mesurée dans le chou frais et celle apportée par la choucroute entière (CE), avec une augmentation passant de 15,13 mg/100 g à 41,28 mg/100 g, soit une concentration presque trois fois plus élevée par rapport au chou non fermenté. Par ailleurs, le jus de choucroute (Ph L), présente une teneur en vitamine C environ 2,3 fois plus faible que celle observée dans la choucroute entière, ce qui suggère que les micronutriments seraient davantage retenus à l'intérieur des cellules végétales. Leur libération n'est que partielle dans le jus, mettant en évidence une meilleure disponibilité intracellulaire des composés bioactifs dans la matrice solide.

IV. Analyse de l'acide lactique par CCM

Les résultats des distances parcourues (Rf) par différents échantillons analysés sont illustrés dans la figure 20 et les valeurs des Rf sont rassemblées dans le tableau VII.

Tableau VII : Analyses de l'acide lactique par CCM

Echantillon	Rf (Rapport frontale)
Ch. j18	0,624 ± 0,12 ^{ab}
Ch. j21	0,652 ± 0,21 ^a
Yaourt	0,615 ± 0,06 ^b
Acide lactique	0,639 ± 0,12 ^{ab}
Acide citrique	0,361 ± 0,06 ^c

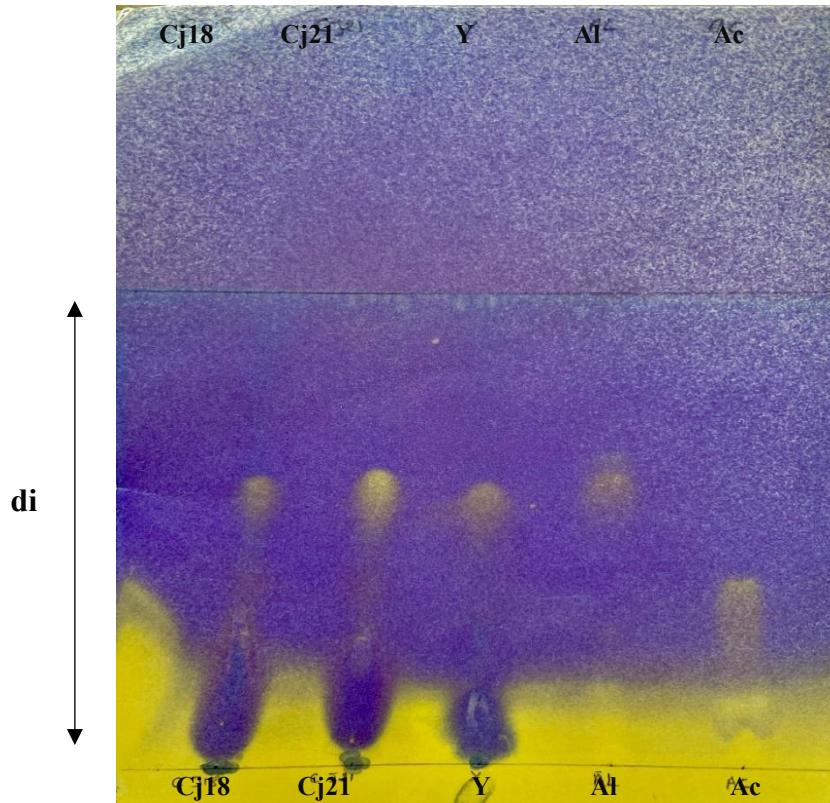


Figure 20 : Résultats de la CCM sur plaque de silice.

L'analyse de l'acide lactique réalisé par CCM met en évidence une valeur Rf d'acide citrique de 0,36 qui se distingue nettement des autres échantillons, indiquant qu'il ne représente pas l'acide majoritaire présent dans la choucroute fermentée.

Le résultat le plus important concerne la différence significative ($p \leq 0,05$) entre les Rf ($\sim 0,6$) déduits de Ch.j18, du Ch.j21, du yaourt et de l'acide lactique, d'une part et le Rf ($\sim 0,4$) de l'acide citrique d'autre part. L'acide lactique serait probablement l'acide dominant dans les choucroutes étudiées.

V Analyses chimiques complémentaires

V.1. Dosage des polyphénols

Les résultats obtenus suite au dosage des polyphénols totaux dans le chou frais et la choucroute lactofermenté j18 et j21 sont illustrés dans la figure 21.

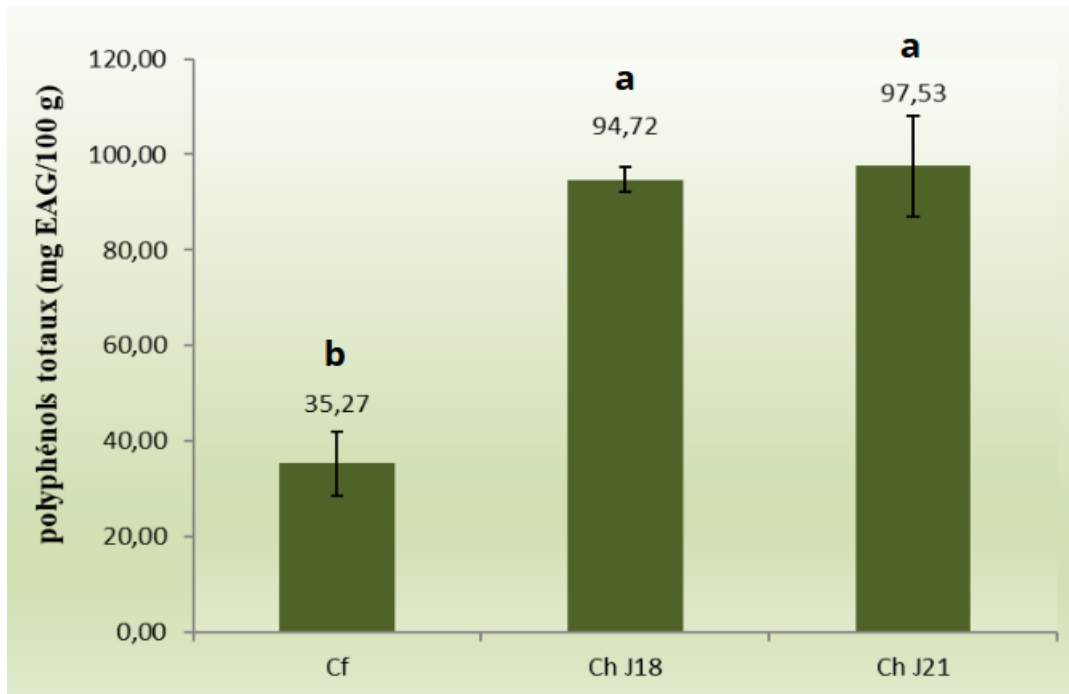


Figure 21 : Teneurs en polyphénols totaux (exprimées en mg EAG /100g de matière fraîche) des extraits éthanoliques du chou frais et de la choucroute obtenue aux 18^e et 21^e jours de fermentation. Les mêmes lettres alphabétiques sur les colonnes indiquent l'absence d'une différence significative ($p \leq 0,05$) entre les moyennes correspondantes dans chou frais et la choucroute.

Le taux de polyphénols dans le chou cru est de 35,27 mg EAG/100 g, valeur inférieure à celle de 62,22 mg EAG/100 g p.f rapportée par **Samec et al. (2019)**. Cette différence serait probablement due à l'utilisation des feuilles internes, moins exposées à la lumière et donc moins riches en composés phénoliques (**Peschel et al., 2006**).

Une augmentation significative des teneurs en polyphénols totaux (TPT) a été observée au cours de la fermentation, atteignant 94,72 mg EAG/100 g au 18^e jour puis 97,53 mg EAG/100 g au 21^e jour, soit environ 2,8 fois plus élevée que celle du chou frais.

L'absence de différence significative entre ces deux dernières valeurs suggère une stabilisation à partir du 18^e jour. Ces résultats sont en accord avec ceux de **Chun et al. (2004)**, qui rapportent des teneurs de 95,5 à 97,9 mg EAG/100 g. Nos résultats sont aussi proches de ceux de **Kapusta et al. (2012)**, estimant la TPT à 108,7 mg/100 g p.f. exprimée en équivalents d'acide chlorogénique.

L'augmentation constatée de la TPT pendant la fermentation pourrait être attribuée à l'action enzymatique des bactéries lactiques, capables d'hydrolyser les liaisons glycosidiques et de libérer les formes actives des polyphénols (aglycones), comme prouvé dans l'étude réalisée par **Ozer et Yildirim, (2019)** et **Park et al. (2017)**. Certains facteurs comme l'oxydation ou le stress acide pourrait aussi altérer certains composés, contribuant ainsi aux variations des valeurs observées (**Yang et al., 2019**).

V.2. Evaluation de l'activité antioxydante

V.2.1. Evaluation de l'activité anti-radicalaire (DPPH)

Les résultats obtenus lors du dosage des antioxydants par méthode DPPH sont présentés dans la figure 22.

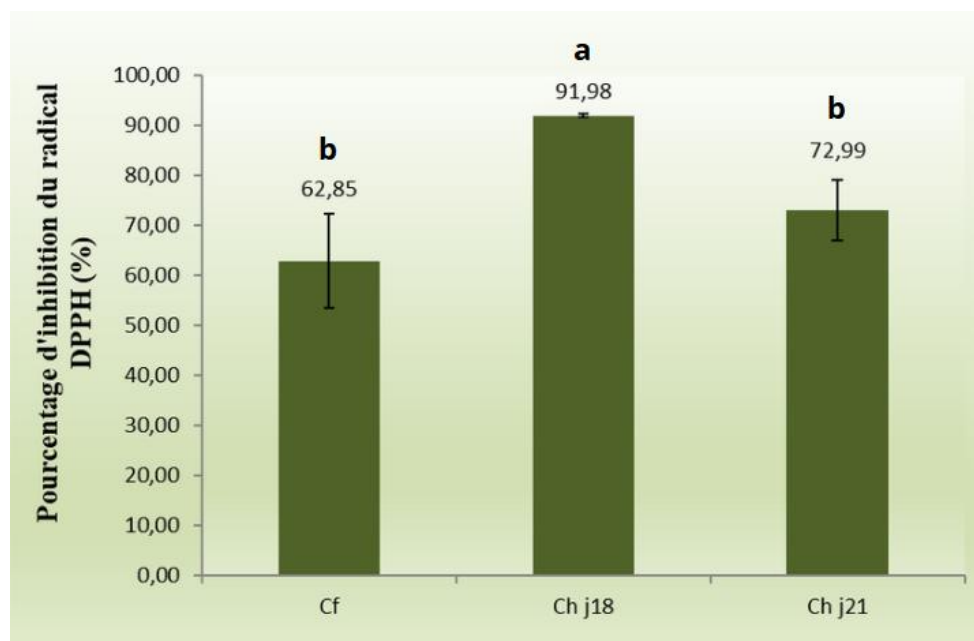


Figure 22 : Activité antiradicalaire des extraits éthanoliques contre le radical DPPH° (exprimée en % d'inhibition du radical DPPH°) du chou frais et de la choucroute obtenue aux 18^e et 21^e jours de fermentation. Les mêmes lettres alphabétiques sur les colonnes indiquent l'absence d'une différence significative ($p \leq 0,05$) entre les moyennes correspondantes.

Les valeurs obtenues lors du dosage de l'activité antioxydante par la méthode DPPH montrent une augmentation significative ($p \leq 0,05$) pendant la fermentation selon l'analyse statistique, passant de 62,85 % pour le chou frais à 91,98 % au 18^e jour, soit une hausse d'environ 1,5 fois par rapport au produit initial. Cette amélioration est attribuée à la libération de composés bioactifs tels que les polyphénols et flavonoïdes, ainsi qu'à l'action des bactéries lactiques, qui génèrent des métabolites antioxydants au cours du processus. (Suleman *et al.*, 2025). Il n'y a pas de différence significative ($p > 0,05$) entre Chj18 et Chj21 en termes d'activité antiradicalaire.

Ces résultats montrent des tendances similaires à ceux rapportés par Suleman *et al.* (2025) et Melini *et al.* (2019), Ces auteurs soulignent l'effet bénéfique de la fermentation sur les propriétés antioxydantes des légumes Park *et al.* (2017) et Kusznierevicz *et al.* (2008) confirment également l'effet favorable de la fermentation sur la biodisponibilité des antioxydants présents naturellement dans le chou.

Cependant, une baisse notable est observée au 21^e jour, avec un taux d'antioxydants de 72,99 %. D'un point de vue statistique, la teneur mesurée à J21 est proche de celle du chou frais, ce qui suggère que la prolongation de la fermentation au-delà de jour 18 n'apporte pas de bénéfice supplémentaire sur le plan antioxydant. Cette diminution pourrait s'expliquer par la dégradation progressive des composés bioactifs ou une stabilisation des réactions oxydatives. Elle met également en évidence l'importance des conditions de fermentation lesquelles qui influencent fortement la préservation ou la dégradation de ces composés (Penas *et al.*, 2010).

V.2.2. Dosage du pouvoir réducteur des antioxydants

Les résultats obtenus lors de l'évaluation de l'activité antioxydante par le biais du pouvoir réducteur (PR) sont illustrés dans la (Figure23).

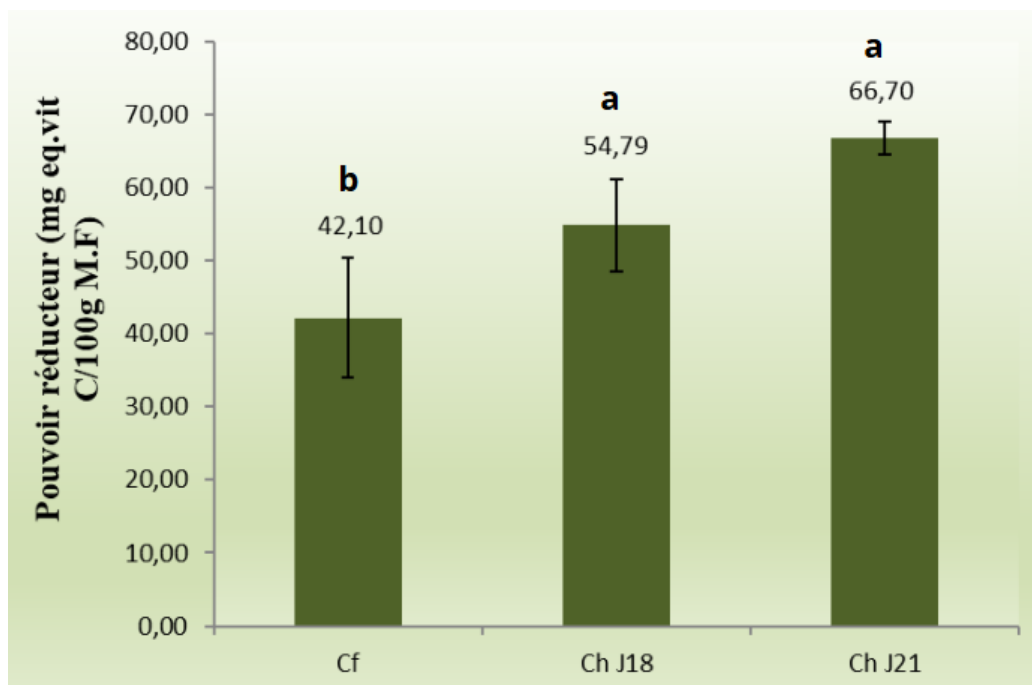


Figure 23 : Pouvoir réducteur (exprimé en mg eq.vit C /100g de matière fraîche) des extraits éthanoliques du chou frais et de la choucroute obtenue aux 18^e et 21^e jours de fermentation. Les mêmes lettres alphabétiques sur les colonnes indiquent l'absence d'une différence significative ($p \leq 0,05$) entre les moyennes correspondantes.

Les valeurs du PR obtenus sont de 66,4 mg eq.vitC/100 g dans la choucroute jour 21. Cette valeur est proche de celle (68,4 mg eq.vit C/100 g) rapportée par **Chun et al. (2004)**, pour la choucroute en conserve. Ces mêmes auteurs ont trouvé un PR de et 57,1 mg eq.vitC/100g dans la choucroute en sachet, valeur proche du résultat obtenue dans notre étude au jour 18 de fermentation qui est de 54.79 mg eq.vitC/100g. Notons que comme le DPPH il n'y a pas de différence significative ($p > 0,05$) entre Chj18 et Chj21 en termes de PR.

L'activité antioxydante du Chj21 (66.7 mg eq.vitC/100g) vaut de 1.6 fois plus élevée, à celle du chou frais (42.1 mg eq.vitC/100g), signifiant que la fermentation lactique améliore la capacité du chou à neutraliser les radicaux libres et donc à protéger les cellules contre le stress oxydatif.

Une corrélation positive existe entre la teneur en polyphénols totaux (TPT) et l'activité antioxydante, indiquant que l'augmentation du TPT entraîne une élévation de la capacité antioxydante. Cette synergie entre la fermentation et la disponibilité des polyphénols amplifie l'activité réductrice du produit final. Cette relation a également été confirmée par l'étude menée par **Chun et al. (2004)**, qui ont démontré que les composés phénoliques sont parmi les principaux contributeurs à l'activité antioxydante des végétaux.

VI. Analyses microbiologiques :

VI.1. Analyse de la qualité microbiologique de la choucroute

Les résultats des analyses microbiologiques obtenus sont présentés dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Analyses microbiologiques effectuées sur le produit fini (*SGG Algérie, 2017*).

Germes analyser	Résultats (J18)	Normes
Flores aérobie totale	$2,1 \times 10^4$	5×10^6
<i>Coliformes fécaux (E.Coli)</i>	Absence	Abs
<i>Coliformes totaux</i>	Absence	–
Levures	10^4	–
Moisissures	Absence	–
<i>Staphylococcus aureus</i>	Absence	Abs
<i>Salmonella</i>	Absence	Abs dans 25g
Flores lactiques	$1,1 \times 10^6$	$> 10^6$

Les données de ce tableau, montrent que le produit final présente une qualité microbiologique globalement satisfaisante. Aucun germe pathogène recherché, tels que les coliformes totaux, les coliformes fécaux (*Escherichia coli*), *Staphylococcus aureus* et *Salmonella spp.*, n'a été détecté, ce qui signifie un bon respect des conditions hygiénique tout au long du processus de fermentation.

On observe ainsi, une flore lactique bénéfique présente en quantité élevée ($1,1 \times 10^6$ UFC/ml), significative du développement des bactéries lactiques et donc du bon déroulement de la fermentation, contribuant de la sorte à la stabilité et à la sécurité du produit. La flore mésophile aérobie totale ($2,1 \times 10^4$ UFC/ml) reste modérée et conforme aux normes microbiologiques algériennes pour les produits fermentés. Les levures ont été détectées à hauteur de 10^4 UFC/ml. Cette valeur reste toutefois dans les normes pour un produit fermenté. De plus les levures font partie d'une flore normale et ne doivent pas rentrer dans les critères de qualités ; elles n'ont aucun rôle dans la genèse de toxi-infection (**Bourgeois, 1996**). Aucune moisissure n'a été détectée. Cela reflète les conditions environnementale et physicochimiques défavorables au développement de cette microflore.

VI.2. Etude macroscopique et microscopique (coloration de Gram)

Les critères macroscopiques étudiées sont représentés dans le tableau IX.

Tableau IX : Etude macroscopique des bactéries lactiques

Critères étudiés	<i>Lactobacillus spp.</i>	<i>Streptococcus spp.</i>
Forme	Ronde régulière	Ronde
Couleur	Blanc cassé	Blanc à grisâtre
Opacité	Opaque	Opaque
Relief	Convexe (bombé)	Plate
Surface	Lisse, brillante	Lisse, parfois mate
Taille	Moyenne (2 à 4 mm)	Petite (1 à 2 mm)
Odeur	Odeur caractéristique	Odeur caractéristique

Les figures 24 et 25 montrent les résultats d'analyses macroscopique et microscopique des bactéries lactiques du genre bacilles et du genre coque, respectivement.

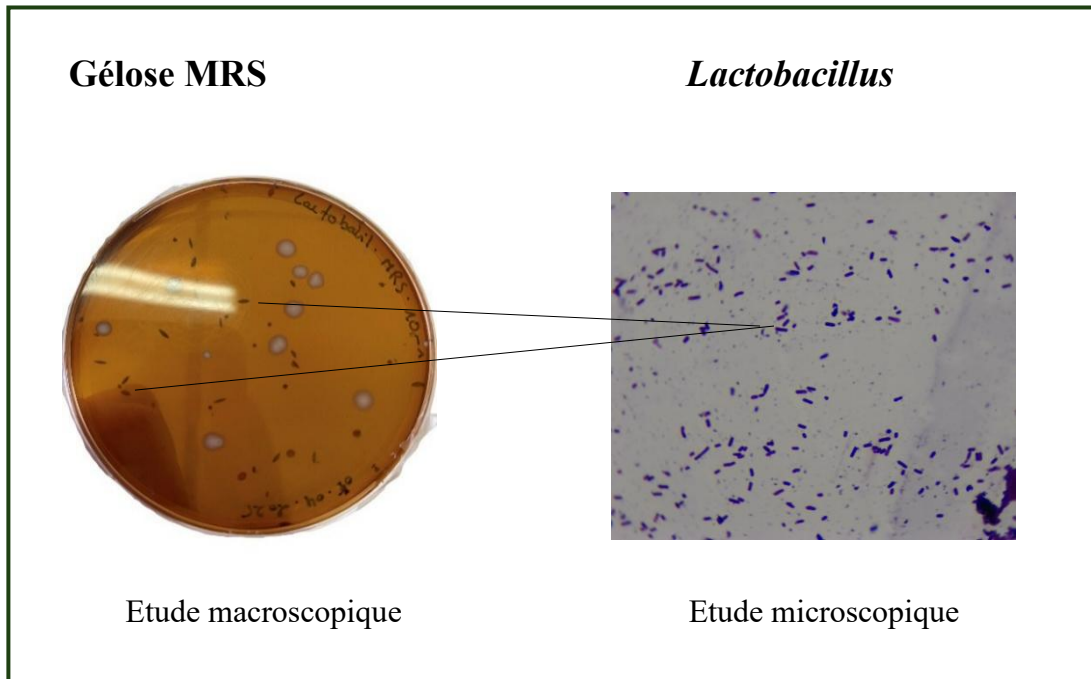


Figure 24 : Photographie de bactéries lactiques de genre bacilles sur gélose MRS et sous microscope optique

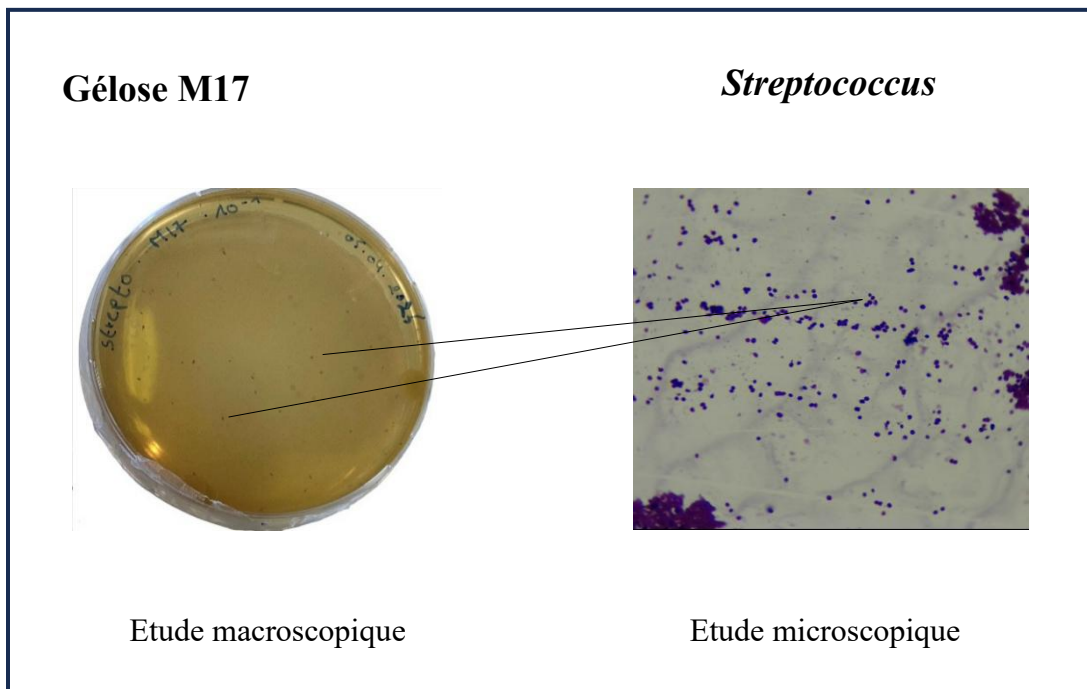


Figure 25 : Photographie de bactéries lactiques de genre coque sur gélose M17 et sous microscope optique

L'observation microscopique après la coloration de Gram a révélé que les bactéries des genres *Lactobacillus* et *Streptococcus* apparaissent en violet, ce qui indique qu'elles sont Gram positif. Elles possèdent par conséquent une paroi cellulaire épaisse riche en peptidoglycane, capable de retenir le colorant cristal violet après la décoloration.

Les bactéries lactiques du genre *Lactobacillus* se présentent sous forme de bâtonnets (Bacillaire). Les *streptococcus* quant à eux apparaissent sous forme de coques en chainettes ou isolées (Cocci).

VI.3. Test de catalase

Les résultats du test catalase sont donnés dans le tableau X.

Tableau X : Test de catalase réaliser sur lactobacillus et streptococcus

Bactérie	Résultat du test catalase	Interprétation
<i>Lactobacillus</i>	Négatif (-)	Pas de production de bulles, absence de catalase
<i>Streptococcus</i>	Négatif (-)	Pas de production de bulles, absence de catalase

La catalase est une enzyme produite par certaines bactéries, leurs permettant de résister contre le stress oxydatif, Cette caractéristique leur donne un avantage du point de vue résistance dans des environnements hostiles.

Le test à la catalase réalisé sur les souches isolées de la choucroute a révélé des résultats négatifs, confirmant l'absence de production de l'enzyme catalase par les bactéries lactiques dominantes. Cette caractéristique est typique des genres *Streptococcus* et *Lactobacillus*, fréquemment rencontrés dans les fermentations lactiques spontanées. L'absence de bulles lors de l'ajout de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) indique que ces bactéries ne possèdent pas l'enzyme catalase, ce qui est cohérent avec leur métabolisme anaérobie ou micro-aérophile, et confirme leur appartenance au groupe des bactéries lactiques.

VII. Analyse sensorielle de la choucroute

Les résultats du test de dégustation réalisés sur la choucroute sont illustrés par la figure 26.

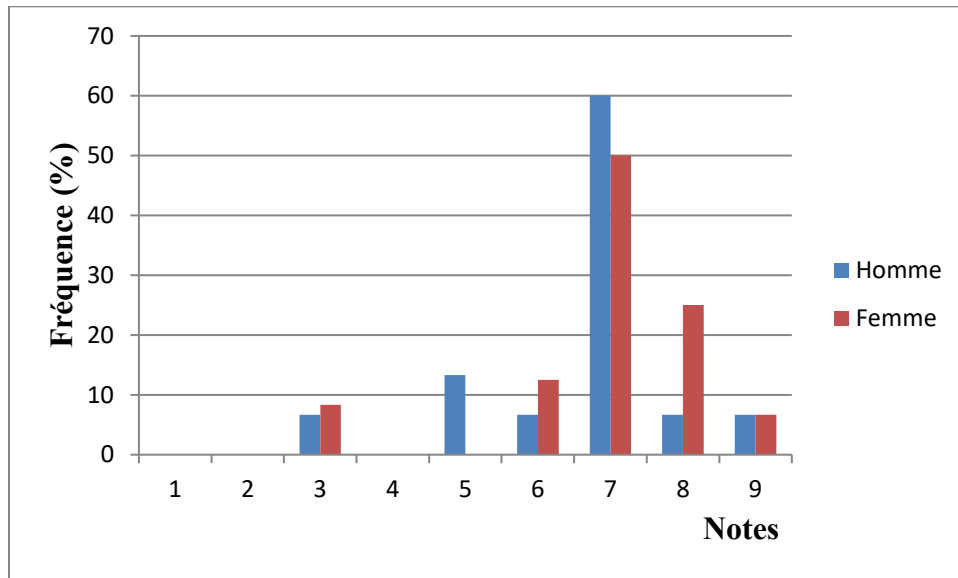


Figure 26 : Histogramme représentant la fréquence (en %) des réponses au test hédonique selon l'échelle de notes de 1 à 9 pour l'évaluation sensorielle de la choucroute.

L'analyse de l'histogramme montre que la majorité des participants, les hommes comme les femmes, ont attribué des notes élevées à la choucroute, avec une prédominance de la note 7 chez les hommes (60 %). On n'observe pas cette prédominance chez les femmes.

En revanche, les notes faibles (inférieures à 6) représentent environ 18 % chez les hommes et près de 22 % chez les femmes. Cela confirme une appréciation sensorielle globalement positive, malgré quelques avis plus réservés, principalement du côté féminin.

Conclusion et perspectives



Conclusion

La lactofermentation est un processus naturel utilisé depuis des siècles pour conserver les aliments tout en améliorant leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques. Ce phénomène repose sur l'action métabolique des bactéries lactiques (BL), présentes à la surface des légumes. Ces microorganismes transforment les sucres simples en acide lactique. Ce dernier abaisse le pH du milieu, inhibant ainsi la croissance des microorganismes pathogènes et garantissant la sécurité alimentaire du produit fermenté.

Notre étude avait pour objet la mise en œuvre d'une fermentation lactique spontanée du chou pommé vert, dans le but d'évaluer la possibilité de produire localement la choucroute (chou lactofermenté) connu pour être un aliment fonctionnel. Les résultats ont confirmé cette possibilité.

La biotransformation appliquée s'est traduite notamment par une augmentation significative de la teneur en acide lactique et en vitamine C. Cette dernière a augmenté de 173% par rapport à la teneur initiale dans les choux frais, ce qui renforce le potentiel immunostimulant de la choucroute. Parallèlement, la teneur en polyphénols totaux a également connu une nette hausse, traduisant une activité antioxydante renforcée, ce qui suggère un impact bénéfique sur la santé en lien avec la consommation régulière de produits lactofermentés.

Sur le plan microbiologique, les analyses ont révélé une prolifération dominante de bactéries lactiques, avec une charge atteignant $1,1 \times 10^6$ UFC/ml, témoignant d'une fermentation réussie et maîtrisée. L'absence de germes pathogènes comme *Salmonella spp.*, *Staphylococcus aureus* ou *Escherichia coli* confirme en outre la sécurité sanitaire du produit final. Ces résultats valident ainsi l'efficacité et l'intérêt de la fermentation lactique comme méthode de transformation et de valorisation du chou vert, en améliorant à la fois sa stabilité, ses qualités nutritionnelles et ses propriétés fonctionnelles.

Perspectives

Les légumes lacto-fermentés représentent bien plus qu'un simple aliment traditionnel : ils incarnent une convergence entre science, santé et culture culinaire, ouvrant des voies pour de multiples recherches pouvant permettre :

- Une caractérisation spécifiques des communautés microbiennes impliquées dans la fermentation spontanée,
- Une analyse approfondie du milieu réactionnel à l'effet de mettre en évidence possiblement d'autres métabolites (vitamines du groupe B, isomères optiques de l'acide lactique...)
- Une étude sur l'effet de différentes température sur la fermentation des choux ,
- Développement de produits dérivés, comme des jus de fermentation fonctionnels, ou des extraits fermentés.
- Extraction d'ingrédients actifs : Des procédés peuvent être envisagés pour extraire les polyphénols, flavonoïdes ou acides organiques pour la formulation d'additifs naturels pour l'industrie agroalimentaire.

Références bibliographiques



Références bibliographiques

- Abbas, Dj., Helal, W. Benahmed Djilali, A., & Benamara, S. (2021). Preliminary investigation of the spontaneous lacto-fermentation of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) grown in northern Algeria, {hal-03206113} (Preprint). Retrieved from <https://hal.science/hal-03206113/>
- Abedi, E., & Hashemi, S. M. B. (2020). Lactic acid production – producing microorganisms and substrates sources-state of art. *Heliyon*, 6(10), e04974. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04974>
- Ajoyah, M. O., & Rakotomavo, H. (2007). Yield performance of five cabbage (*Brassica oleracea* var. *Capitata*) varieties compared with the local variety under open field conditions in Seychelles. *Journal of Sustainable Development in Agriculture & Environment*, 3 (1), 76–80.
- Algérie, SGG. (2017). *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*. <https://www.joradp.dz/>
- Andernach, L., Witzel, K., & Hanschen, F. S. (2023). Effect of long-term storage on glucosinolate and S-methyl-l-cysteine sulfoxide hydrolysis in cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*). *Food Chemistry*, 430, 136969. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136969>
- Anguly, Subha. Chemical aspects of fermentation technology in food processing industries. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences* 1.1 (2013): 42-43.
- Ashok, K., Guse, K., Sharma, A., Davison, S., Ma, Y., Choi, Y., ... Gomez, A. (2023). Regular consumption of lactofermented vegetables has greater effects on the gut metabolome compared with the microbiome. *Gut Microbiome*, 1 (1), e00009. <https://doi.org/10.1017/gmb.2023.9>
- B, M. (2018). Sauerkraut Fermentation : Process, Microbiology, Defects and Spoilage | Industrial Microbiology. Biology Discussion.
- Balkaya, A., Yanmaz, R., & Kar, A. A. (2005). Morphological characterization of white head cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* subvar. *alba*) genotypes in Turkey. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 33(3), 333–341.
- Barcella L., Barbaro A. P., Rogolino S. B. (2016). “Colonial morphology of *Escherichia coli*: impact of detection in clinical specimens”. *Microbiologia Medica*, 31(2).
- Barinov A. Bolotin A. Langella P. Maguin E. Van De Guchte, (2011). Genomics of the genus *Lactobacillus*. In « Lactic Acid Bacteria and Bifidobacteria: Current Progress in Advanced Research » Sonomoto and Yokota/ Caister Academic Presséd. Norfolk. United Kingdom. pp. 3-32.

- Bautista-Gallego, J., Medina, E., Sánchez, B., Benítez-Cabello, A., & Arroyo-López, F. N. (2020). Role of lactic acid bacteria in fermented vegetables. *Grasas y Aceites*, 71 (2), 358. <https://doi.org/10.3989/gya.0199191>
- Begrache, L., Leclercq-Perlat, M.-N., Onno, B., & Corrieu, G. (2021). Impact of temperature and salt concentration on microbial dynamics during sauerkraut fermentation. *Innovations Agronomiques*, 83 , 113–124. <https://doi.org/10.15454/ISTE.2021.083.010>
- Ben-David, A., & Davidson, C. E. (2014). Estimation method for serial dilution experiments. *Journal of Microbiological Methods*, 107, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2014.08.023>
- Bottari, B., Castellone, V., Bancalari, E., Rubert, J., Gatti, M., Neviani, E., & Bottari, B. (2021). Eating Fermented: Health Benefits of LAB-Fermented Foods. *Foods*, 10 (11), 2639. <https://doi.org/10.3390/foods10112639>
- Bourat, G. (1993). *Fermentation : propriétés et utilisation des microorganismes* . Techniques de l'ingénieur ISTRAL. Cassette Paris.
- Bourebria, N., & Yachir, W. (2024). Analyse de l'acidité de l'huile d'olive obtenue par la méthode de Bouzeguène –Possibilité d'une nouvelle formulation alimentaire. Mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri.
- Bourgeois, C. M., Mesclé, J. F., & Zucca, J. (1996). *Microbiologie alimentaire. Aspects microbiologiques de la sécurité et de la qualité des aliments* (Tome 1). Paris : Lavoisier/Tec & Doc.
- Bousquet, J., Anto, J.M., Czarlewski, W., Haahtela, T., Fonseca, S.C., Iaccarino, G., Blain, H., Vidal, A., Sheikh, A., Akdis, C.A., Zuberbier, T., & ARIA group. (2021). Cabbage and fermented vegetables: From death rate heterogeneity in countries to candidates for mitigation strategies of severe COVID-19. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 76 (3), 735-750. <https://doi.org/10.1111/all.14549>
- Callewaert T. and De Vuyst L. (2000). Bacteriocin production with *L. amylovorus* DCE471 is improved and stabilized by fed-batch fermentation. *Appl. Environ. Microbiol.* 66(2) : 606- 613. *Analyses* , 2011.
- Capozzi, V., Fragasso, M., Romaniello, R., Berbegal, C., Russo, P., & Spano, G. (2017). Spontaneous food fermentations and potential risks for human health. *Fermentation*, 3 (49), 2-19. <http://dx.doi.org/10.3390/fermentation3040049>
- Carmen, M ; Jan Kok, EH ; Pelaez, C ; Requena, T et Buist G. (2000). *Applied and Environmental Microbiology*, Aug., Pp : 3174-3179.
- Chaudhari, S. S., & Suryawanshi, R. S. (2013). A simple assay for measuring catalase activity: A visual approach. *Journal of Microbiological Methods*, 95(3), 472–476. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2013.05.012>

- Chiang, R. H., Barron, T. M., & Storey, V. C. (1994). Reverse engineering of relational databases : Extraction of an EER model from a relational database. *Data & knowledge engineering*, 12(2), 107-142.
- Chilton, S.N., Burton, J.P., & Reid, G. (2015). Inclusion of fermented foods in food guides around the world. *Nutrients*, 7, 390-404. <https://doi.org/10.3390/nu7010390>
- Chojnacka, K. (2006). Fermentation products. *Chemical Engineering and Chemical Process Technology*, 12 .
- Chun, O. K., Smith, N., Sakagawa, A., & Lee, C. Y. (2004). Antioxidant properties of raw and processed cabbages. *International Journal Of Food Sciences And Nutrition*, 55(3), 191-199. <https://doi.org/10.1080/09637480410001725148>
- Coico, R. (2005). Gram staining. *Current Protocols In Microbiology*, 00(1). <https://doi.org/10.1002/9780471729259.mca03cs00>
- Corrieu G. Luquet FM. (2008). The taxonomy of lactic acid bacteria. In: « Bactéries lactiques, de la génétique aux ferments ». TEC&DOC/ Lavoisier éd. Paris. France. 19-106
- Curiel, J. A., Rizzello, C. G., Salzano, G., & Di Cagno, R. (2015). Exploitation of vegetable potential and technological functionalities by lactic acid bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 6 , 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01020>
- Fang W, Bjora Budde B & Siegumfeldt H (2006). Leucocins 4010 From *Leuconostoc canosum* cause a matrix related decrease in intracellular pH of *Listeria monocytogenes*. College
- Frias, J., Martinez-Villaluenga, C., & Peñas, E. (2017). *Fermented Foods in Health and Disease Prevention*, Academic Press publications, Elsevier Inc., 761 p.
- Gaudioso, G., Weil, T., Marzorati, G., Solovyev, P., Bontempo, L., Franciosi, E., Bertoldi, L., Pedrolli, C., Tuohy, K. M., & Fava, F. (2022). Microbial and metabolic characterization of organic artisanal sauerkraut fermentation and study of gut health-promoting properties of sauerkraut brine. *Frontiers in Microbiology*, 13 , 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.929738>
- Guetarni H. (2013). Effets antibactériens des bactéries lactiques isolées à partir des laits Crus Algériens sur la croissance de *Helicobacter pylori*. Thèse de doctorat science de la nature et de la vie. . Oran: Université d'Oran Es-Sénia, p 36, 73.
- Hakim, B. N. A., Xuan, N. J., & Oslan, S. N. H. (2023). A Comprehensive Review of Bioactive Compounds from Lactic Acid Bacteria : Potential Functions as Functional Food in Dietetics and the Food Industry. *Foods*, 12(15), 2850. <https://doi.org/10.3390/foods12152850>
- Holzappel, W. H., Schillinger, U., & Buckenhüskes, H. (2008). Sauerkraut. In E. R. Farnworth (Ed.), *Handbook of Fermented Functional Foods* (2nd ed., pp. 395–412). CRC Press

- International Organization for Standardization. (1991). *ISO 4833:1991 – Microbiology — General guidance for the enumeration of microorganisms — Colony-count technique at 30 degrees C*. 2e édition, 1er mars 1991. Genève : ISO.
- ISO. (2021). *ISO 6888-1:2021 – Microbiology of the food chain: Horizontal method for the enumeration of coagulase-positive staphylococci (Staphylococcus aureus and other species) – Part 1: Method using Baird-Parker agar medium*.
- Isabelle Savary Auzeloux. (2021). Apport nutritionnel et propriétés santé des légumes fermentés . Innovations Agronomiques.
- Juntachote, T., Berghofer, E., Bauer, F., & Siebenhandl, S. (2006). Antioxidative properties and stability of ethanolic extracts of Holy basil and Galangal. *Food Chemistry*, 103(3), 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.004>
- Kamal, R. M., Razis, A. F. A., Mohd Sukri, N. S., Perimal, E. K., Ahmad, H., Patrick, R., ... Rigaud, S. (2022). Beneficial health effects of glucosinolates-derived isothiocyanates on cardiovascular and neurodegenerative diseases. *Molecules*, 27 (9), 3072. <https://doi.org/10.3390/molecules27093072>
- Kapusta-Duch, J., Leszczyńska, T., & Filipiak-Florkiewicz, A. (2012). Comparison of total polyphenol contents and antioxidant activity in cruciferous vegetables grown in diversified ecological conditions. *Journal of Food Science and Agriculture*, 92(10), 2143–2150.
- Karovičová, J., & Kohajdová, Z. (2003). Lactic acid fermented vegetable juices. *Horticultural Science (Prague)*, 30 (4), 152-158. <https://doi.org/10.17221/3878-HORTSCI>
- Khanna, S. (2019). Effects of salt concentration on the physicochemical properties and microbial safety of spontaneously fermented cabbage. *Electronic Theses and Dissertations*. 3013. Retrieved from <https://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/3013>
- Kusznierewicz, B., Śmiechowska, A., Bartoszek, A., & Namieśnik, J. (2008). L'effet du chauffage et de la fermentation sur les propriétés antioxydantes du chou blanc. *Chimie alimentaire*, 108 , 853–861.
- Lane, Nick; Allen, John F.; Martin, William (2010). "How did LUCA make a living? Chemiosmosis in the origin of life". *BioEssays*. 32 (4): 271–280
- Le Guen, M. (2001). La boîte à moustaches de TUKEY, un outil pour initier à la statistique. *Statistiquement votre-SFDS*, (4), 1-3.
- Liu, Y., Chen, X., Li, F., Shi, H., He, M., Ge, J., Ling, H., & Cheng, K. (2023). Analysis of microbial diversity and metabolites in sauerkraut products with and without microorganism addition. *Foods*, 12 (6), 1164. <https://doi.org/10.3390/foods12061164>

- Liu, Y., Wang, T., Xing, Z., Ma, Y., Nan, F., Pan, L., & Chen, J. (2022). Anaerobic co-digestion of Chinese cabbage waste and cow manure at mesophilic and thermophilic temperatures: Digestion performance, microbial community, and biogas slurry fertility. *Bioresource Technology*, 363, 127976. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127976>
- Major, N., Bažon, I., Išić, N., Kovačević, T. K., Ban, D., Radeka, S., & Ban, S. G. (2022). Bioactive properties, volatile compounds, and sensory profile of sauerkraut are dependent on cultivar choice and storage conditions. *Foods*, 11 (9), 1218. <https://doi.org/10.3390/foods11091218>
- Makhloufi, K. M. (2011). Caractérisation d'une bactériocine produite par une bactérie Lactique *Leuconostoc pseudomesenteroides* isolée du boza. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie. Spécialité : microbiologie, biochimie (école doctorale iviv) Mc Auliffe et al (2001). In *Bacteriocins : biological tools for bio preservation and shelf-life extension*. International Dairy Journal .2006
- Martinez-Villaluenga, C., Peñas, E., Frias, J., Ciska, E., Honke, J., Piskula, M., Kozłowska, H., & Vidal-Valverde, C. (2008). Influence of Fermentation Conditions on Glucosinolates, Ascorbigen, and Ascorbic Acid Content in White Cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata cv. Taler) Cultivated in Different Seasons. *Journal Of Food Science*, 74(1). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.01017.x>
- Mast Group Ltd. (2020). Rappaport-Vassiliadis Soja (bouillon) DM269 – Fiche technique (V5) [Fiche technique]. Mast Diagnostic.
- Mathur, H., Beresford, T. P., & Cotter, P. D. (2020). Health Benefits of Lactic Acid Bacteria (LAB) Fermentates. *Nutrients*, 12(6), 1679. <https://doi.org/10.3390/nu12061679>
- Melini, F., Melini, V., Luziatelli, F., Grazia Ficca, A., & Ruzzi, M. (2019). Health-Promoting Components in Fermented Foods: An Up-to-Date Systematic Review. *Nutrients*, 11 (5), 1189. <https://doi.org/10.3390/nu11051189>
- Molyneux, P. (2004). *The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity*. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, 26(2), 211–219.
- Montaño, A., Sánchez, A. H., Beato, V. M., López-López, A., & De Castro, A. (2016). Pickling. *Encyclopedia of Food and Health*, 369-374.
- Mossel, D. A. A., Kleynen-Semmeling, A. M. C., Vincentie, H. M., Beerens, H., & Catsaras, M. (1970). Oxytetracycline-glucose-yeast extract agar for selective enumeration of moulds and yeasts in foods and clinical material. *Journal of Applied Bacteriology*, 33(3), 454–457. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1970.tb02242.x>

- Narayanan, N., Roychoudhury, P. K., & Srivastava, A. (2004). *L-(+)-lactic acid fermentation and its product polymerization*. *Electronic Journal of Biotechnology*, 7(2), 167–178.
DOI : 10.4067/S0717-34582004000200008
- NIH. (2021). Office of Dietary Supplements – Vitamin C. National Institutes of Health.
<https://ods.od.nih.gov/factsheets/VitaminC-HealthProfessional/>
- Oyaizu, M. (1986). Studies on the products of browning reaction prepared from glucosamine: Antioxidative activities of the products. *Japan Journal of Nutrition*, 44, 307–315.
<https://doi.org/10.5264/eiyogakuzashi.44.307>
- Özer, C., & Yıldırım, H. K. (2019a). Some Special Properties of Fermented Products with Cabbage Origin : Pickled Cabbage, Sauerkraut and Kimchi. *Turkish Journal Of Agriculture - Food Science And Technology*, 7(3), 490-497.
<https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i3.490-497.2350>
- Park, S., Jang, H., Lee, J., Choi, Y., Kim, H., Hwang, J., Seo, D., Kim, S., & Nam, J. (2017). Changes in the phenolic compounds and antioxidant activities of mustard leaf (*Brassica juncea*) kimchi extracts during different fermentation periods. *Food Science And Biotechnology*, 26(1), 105-112. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0014-5>
- Park, Y. H., Baek, I. K., Kim, K. B., Kim, C. H., Woo, K. C., & Park, Y. H. (2012). Research and development of lactic acid bacteria exopolysaccharides. *Science and Technology of Food Industry*, (17), 378–381. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2012.17.055>
- Patel, P., Butani, K., Kumar, A., Singh, S., & Prajapati, B. G. (2023). Effects of fermented food consumption on non-communicable diseases. *Foods*, 12 (4), 687.
<https://doi.org/10.3390/foods12040687>
- Peñas, E., Frias, J., Gomez, R., & Vidal-Valverde, C. (2010). High hydrostatic pressure can improve the microbial quality of sauerkraut during storage. *Food Control*, 21 (4), 524–528. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2009.07.008>
- Peñas, E., Martinez-Villaluenga, C., & Frias, J. (2016). Sauerkraut. Dans *Elsevier eBooks* (p. 557-576). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802309-9.00024-8>
- Peschel, W., Sánchez-Rabaneda, F., Diekmann, W., Plescher, A., Gartzia, I., Jiménez, D., Lamuela-Raventós, R. M., Buxaderas, S., & Codina, C. (2006). An industrial approach in the search of natural antioxidants from vegetable and fruit wastes. *Food Chemistry*, 97(1), 137–150.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.03.033>
- Rawoof, S. A. A., Kumar, P. S., Vo, D. N., Devaraj, K., Mani, Y., Devaraj, T., & Subramanian, S. (2020). Production of optically pure lactic acid by microbial fermentation: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19 (1), 539–556. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01083-w>

- Rodriguez J.M., Martínez M.I., Horn N. et Dodd H.M., 2003. Heterologous production of bacteriocins by lactic acid bacteria. *Int. J. Food Microbiol.* 80 : 101-116.
- Ruby,G.E., Abdul Mutalib, N.A., Juhari, N.H., & Zainal Abidin, U.F.U. (2023). Food fermentation technology: Examples of application in Malaysian foods. *Food and Humanity*, 1: 32-37. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.03.003>
- Šamec, D., Pavlović, I., & Salopek-Sondi, B. (2016). White cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *alba*) : botanical, phytochemical and pharmacological overview. *Phytochemistry Reviews*, 16(1), 117-135. <https://doi.org/10.1007/s11101-016-9454-4>
- Satora, P., Skotniczny, M., Strnad, S., & Ženišová, K. (2020). Yeast microbiota during sauerkraut fermentation and its characteristics. *International Journal of Molecular Sciences*, 21 (24), 9699. <https://doi.org/10.3390/ijms21249699>
- Satora, P., Skotniczny, M., Strnad, S., & Piechowicz, W. (2021). Chemical composition and sensory quality of sauerkraut produced from different cabbage varieties. *LWT*, 136 , 110325. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110325>
- Sauvageot, F., Barthélémy, J., Clément, J.F Danzart, M., Issanchou, S., Koster, E.P., Mac Leod, P., Nicod, H., Strigler, F., Touraille, C. (1990). Evaluation sensorielle Manuel méthodologie. Collection sciences et techniques Agroalimentaire 2e édition, 1-345.
- Schropp, N., Bauer, A., Stanislas, V., Huang, K. D., Lesker, T., Bielecka, A. A., Strowig, T., & Michels, K. B. (2025). The impact of regular sauerkraut consumption on the human gut microbiota: A crossover intervention trial. *Microbiome*, 13 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40168-024-02016-3>
- Sherma, J. (2004). Thin layer chromatography. In *Analytical Instrumentation Handbook* (pp. 1021-1040). CRC Press.
- Šikić-Pogačar, M., Turk, D. M., & Fijan, S. (2022). Knowledge of fermentation and health benefits among general population in North-eastern Slovenia. *BMC Public Health*, 22(1), 1695.
- Sionek, B., Szydłowska, A., Trzaskowska, M., & Kołożyn-Krajewska, D. (2024). The Impact of Physicochemical Conditions on Lactic Acid Bacteria Survival in Food Products. *Fermentation*, 10(6), 298. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060298>
- Slamnia i. et Saddok A. (2018). Aptitudes technologiques des souches lactiques locales. mémoire de master en science alimentaire. Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. p 4, 8, 11, 19.
- Slavin, J. L., Lloyd, B. J., & Becerra-Mayor, C. (2012). Qualité nutritionnelle des légumes Brassica.
- Sornoza, E. (2024). *The importance of microbiological analysis in ensuring food safety.* *Journal of Food Microbiology*, 8(3), 204. <https://doi.org/10.35841/aafmy-8.3.204>

- Suleman, D., Rizki, P. R., Susanto, F., Rahmawati, A., Zhulaikah, H. N., Aulia, M., Puspitasari, N., Firdaus, N. N., Ajeng, S., & Hapsari, A. K. (2025). Determination of pH value and
- Süle, J., Kőrösi, T., Huckler, A., & Varga, L. (2014). Evaluation of culture media for selective enumeration of bifidobacteria and lactic acid bacteria. *Brazilian Journal Of Microbiology*, 45(3), 1023-1030. <https://doi.org/10.1590/s1517-83822014000300035>
- Tailliez, P. (2001). Mini-revue : les bactéries lactiques, ces êtres vivants apparus il y a près de 3 milliards d'années. *Dairy Science & Technology*, 81(1-2), 1-11. <https://doi.org/10.1051/lait:2001101>
- Thakur, P. K., Panja, P., & Kabir, J. (2017). Effect of temperature on fermentation and quality of sauerkraut. *Indian Journal of Ecology*, 44(5), 494-496.
- Thakur, P. K., & Kabir, J. (2015). Effect of salt concentration on the quality of sauerkraut. 46-48
- Thin Layer Chromatography (TLC) – Principle, procedure, Applications on BYJU'S. BYJUS. (2022). Retrieved 18 May 2022, from <https://byjus.com/chemistry/thin-layer-chromatography/>.
- Ueda, Y. (1965). Studies on the Desoxycholate Agar for the Detection of the Coliform Group Organisms and the Classification of Isolated Strains by the IMViC Test. *Food Hygiene And Safety Science (Shokuhin Eiseigaku Zasshi)*, 6(6), 540-543. <https://doi.org/10.3358/shokueishi.6.540>.
- Uuh-Narvaez, J. J., & Segura-Campos, M. R. (2021b). Cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) : A food with functional properties aimed to type 2 diabetes prevention and management. *Journal Of Food Science*, 86(11), 4775-4798. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15939>
- Valence-Bertel, F., & Thierry, A. (2019, June). La fermentation de matières premières végétales. In *CTCPA: Journée produits végétaux fermentés non pasteurisés* (p. np).
- Wang, J., Sui, Y., Lu, J., Dong, Z., Liu, H., Kong, B., & Chen, Q. (2023). Exploring potential correlations between bacterial communities, organic acids, and volatile metabolites of traditional fermented sauerkraut collected from different regions of Heilongjiang Province in Northeast China. *Food Chemistry X*, 19, 100840. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100840>
- Witzel, K., Kurina, A. B., & Artemyeva, A. M. (2021). "The Folk-lore of Plants". *Frontiers in Plant Science*, 12, 643047. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.643047>
- Yang, X., Jiang, A., Xiu, Z., Ji, Y., Guan, Y., & Yang, X. (2019). Effect of salt concentration on quality of Chinese northeast sauerkraut fermented by *Leuconostoc mesenteroides* and *Lactobacillus plantarum*. *Food Bioscience*, 30, 100421. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100421>

- Yaribeygi, H., Sathyapalan, T., Atkin, S. L., & Sahebkar, A. (2020). Molecular mechanisms linking oxidative stress and diabetes mellitus. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020, Article 8609213. <https://doi.org/10.1155/2020/8609213>
- Zannini E, Waters DM, Coffey A, Arendt EK. Production, properties, and industrial food application of lactic acid bacteria-derived exopolysaccharides. *Appl Microbiol Biotechnol* 2016;100:1121–35. doi:10.1007/s00253-015-7172-2.
- Zhang, L., Dai, Y., Yue, L., Chen, G., Yuan, L., Zhang, S., Li, F., Zhang, H., Li, G., Zhu, S., Hou, J., Tang, X., Zhang, S., & Wang, C. (2022). Heat stress response in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L.) revealed by transcriptome and physiological analysis. *PeerJ*, 10, e13427. <https://doi.org/10.7717/peerj.13427>
- Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C. M. A. P., Harris, H. M. B., Mattarelli, P., O'Toole, P. W., Pot, B., Vandamme, P., Walter, J., & Watanabe, K. (2020). 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*, 70(4), 2782–2858. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>
- Zdolec N, Kozaeinski L, Hadziosmanović M, Cvrtila Z, and Filipović I (2007). Inhibition Of *Listeria monocytogenes* growth in dry fermented sausages. Department of hygiene and Technology of animal Foodstuffs, Faculty of Veterinary Medicine, University of Zagreb,
- Le chou, un aliment santé aux nombreux bienfaits.* (2024, 6 novembre). <https://www.passeportsante.net/>.
https://www.passeportsante.net/fr/Nutrition/EncyclopedieAliments/Fiche.aspx?doc=chou_nu

Annexes



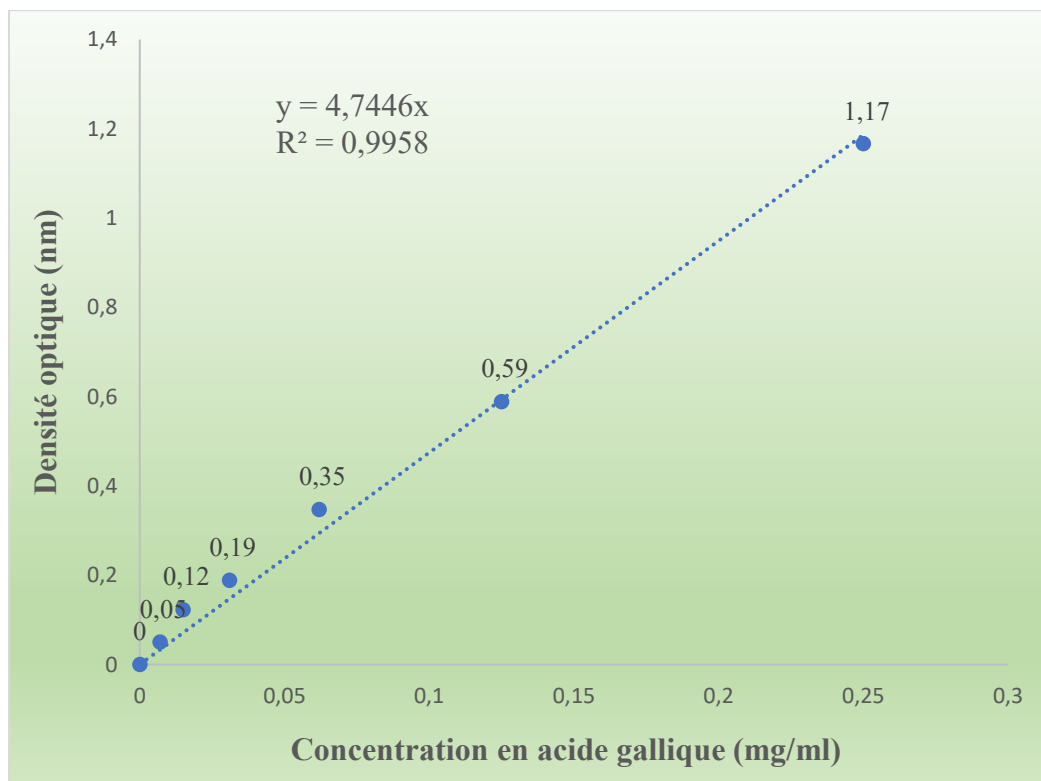
Annexe 1 : Préparation des solutions pour le dosage de la vitamine C.

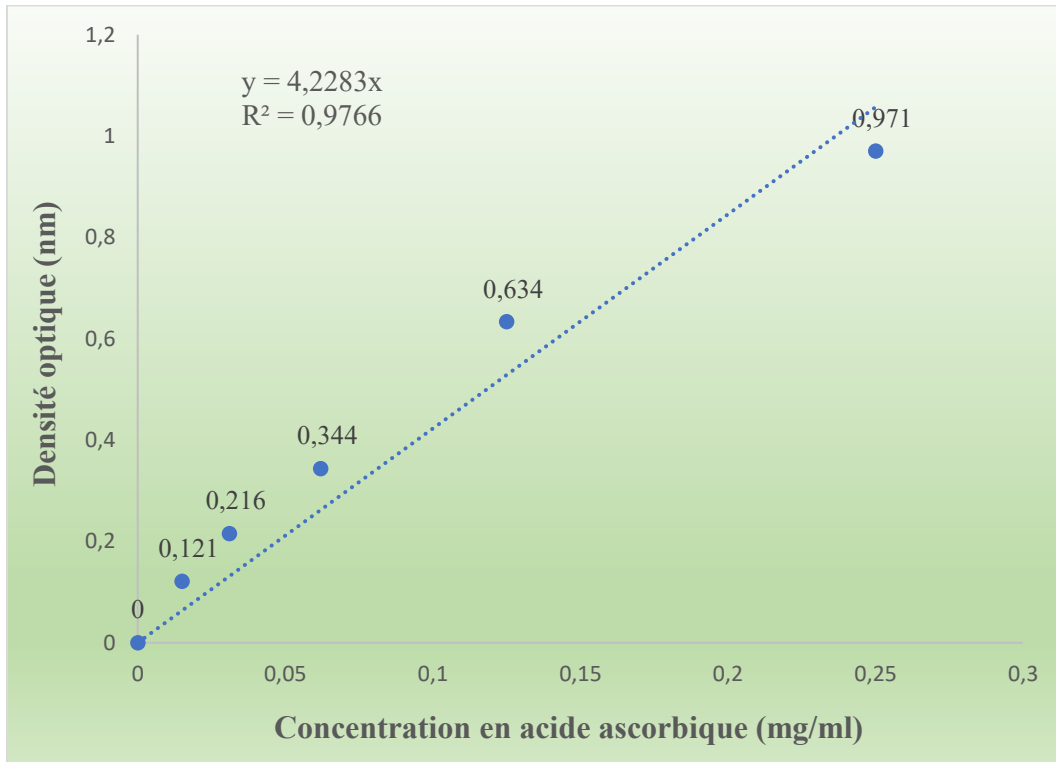
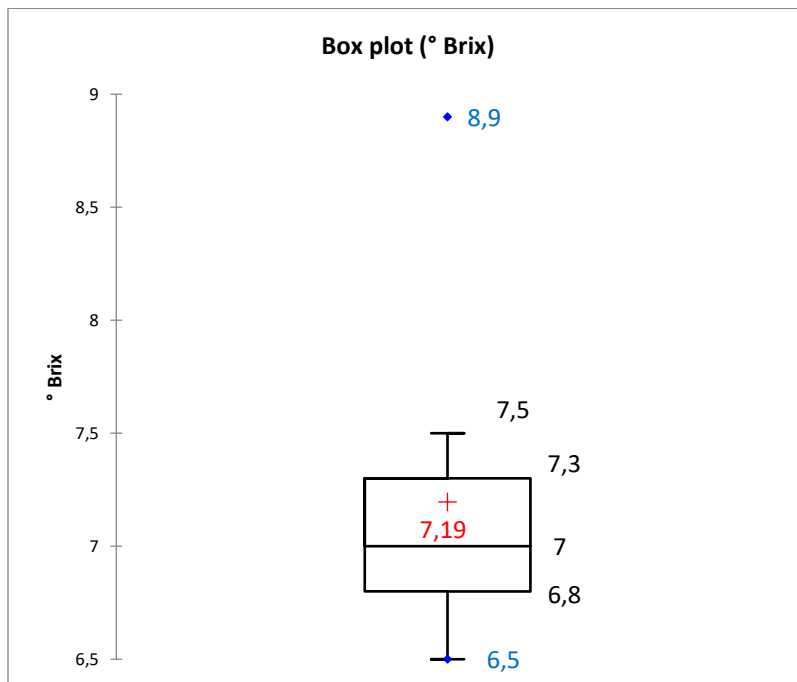
- Solution 2.6 dichlorophénol (DPIP)

Dissoudre 50 mg de DPIP et 48 mg de mono hydrogénocarbonates de sodium (NaHCO_3) dans 500 ml d'eau distillée, filtrer la solution et la conserver au frais et à l'abri de la lumière.

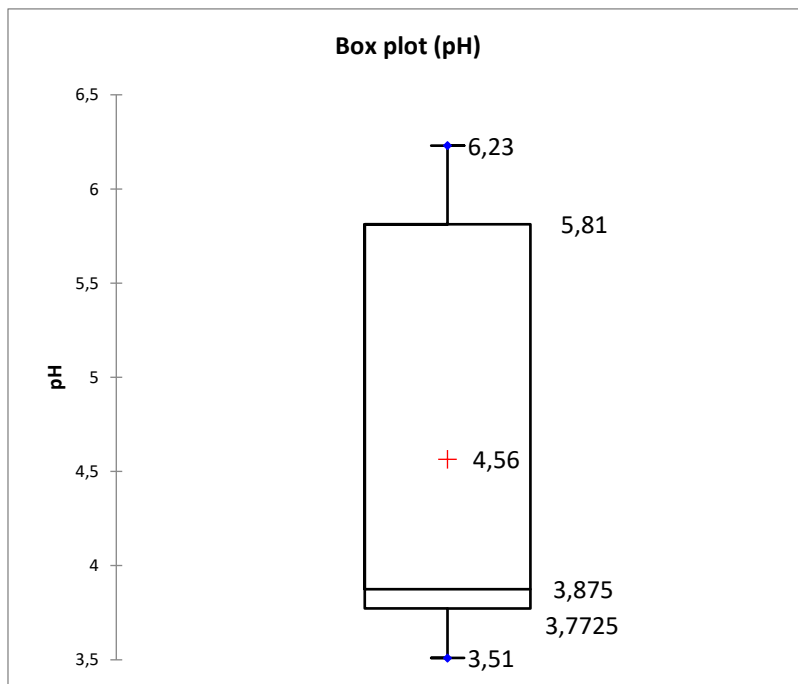
- Solution étalon d'acide ascorbique :

Dissoudre 40 mg d'acide ascorbique pure dans 100 ml d'acide oxalique à 0.25%, puis préparer une solution diluée au 1/10^{ème} avec la solution d'acide oxalique, préparer ensuite une solution d'acide acétique à N/20.

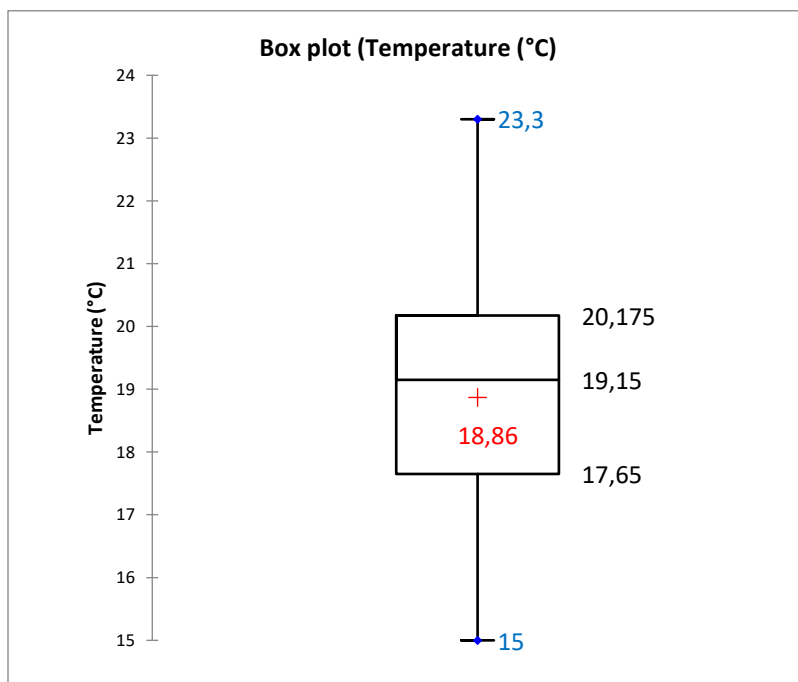
Annexe 2 : Courbe d'étalonnage pour le dosage des polyphénols totaux.

Annexe 3 : Courbe d'étalonnage pour le dosage des antioxydants.**Annexe 4 : Etude statistique du °Brix en utilisant la boîte à moustache**

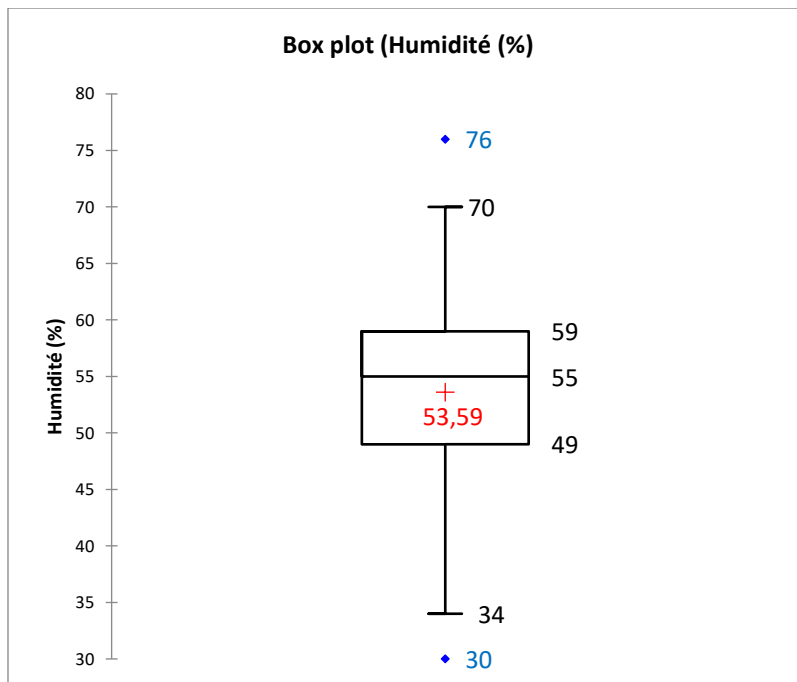
Annexe 5 : Etude statistique du pH en utilisant la boite a moustache



Annexe 6 : Etude statistique de la température en utilisant la boite a moustache



Annexe 7 : Etude statistique de l'humidité en utilisant la boite a moustache



Annexe 8 : Formulaire du test dégustation

Questionnaire

Homme :

Date :

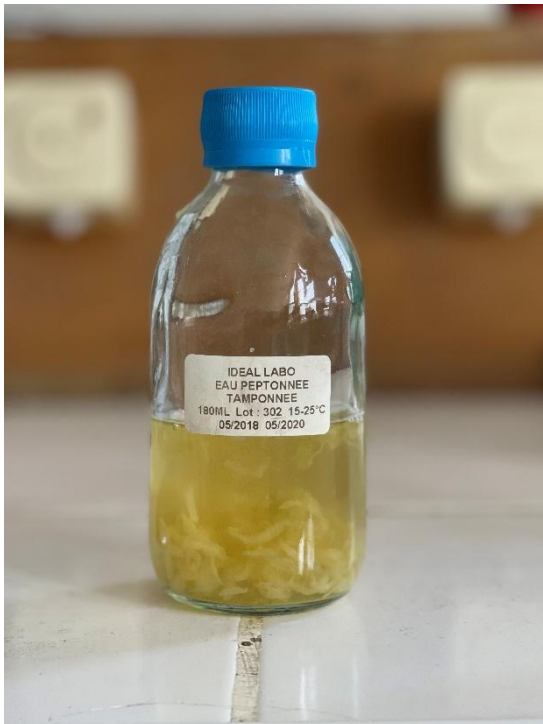
Femme :

Age :

Goutez l'échantillon et cochez le numéro correspondant à votre impression.

- | | |
|--------------------------|-------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | 1. Extrêmement désagréable |
| <input type="checkbox"/> | 2. Très désagréable |
| <input type="checkbox"/> | 3. Désagréable |
| <input type="checkbox"/> | 4. Assez désagréable |
| <input type="checkbox"/> | 5. Ni désagréable ni agréable |
| <input type="checkbox"/> | 6. Assez agréable |
| <input type="checkbox"/> | 7. Agréable |
| <input type="checkbox"/> | 8. Très agréable |
| <input type="checkbox"/> | 9. Extrêmement agréable |

Annexe 11 : pré enrichissement et enrichissement pour la recherche des *salmonella*



Pré enrichissement dans de l'eau peptonnée



Bouillon d'enrichissement après incubation pendant 24h

Résumé

Le but du présent travail vise à évaluer la faisabilité de la fermentation lactique spontanée des choux pommés (*Brassica oleracea var. capitata*) dans la wilaya de Tizi-Ouzou, dans les conditions ambiantes (température non contrôlée) en vue de la préparation d'une choucroute. La température relevée durant ce processus variait entre 15 °C et 23 °C, une plage correspondant à des basses températures généralement considérées comme optimales pour ce type de fermentation. En plus de l'augmentation de l'acidité titrable calculée en acide lactique, la lactofermentation a permis une augmentation de la teneur en vitamine C dans la choucroute de 173% par rapport à sa teneur initiale dans les choux frais. L'analyse par chromatographie sur couche mince (CCM) a permis de mettre en évidence la présence probable d'acide lactique en tant qu'acide organique dominant. A propos des analyses chimiques complémentaires (polyphénols, activité antiradicalaire et pouvoir réducteur) les résultats trouvés révèlent une différence significative ($p \leq 0,05$) est observée entre le chou frais et les choucroutes en ce qui concerne la teneur en polyphénols et l'activité antioxydante, avec une corrélation positive entre ces deux paramètres. Le produit final a présenté une qualité microbiologique satisfaisante, avec une forte présence de bactéries lactiques ($1,1 \times 10^6$ UFC/ml). L'évaluation sensorielle a révélé une bonne acceptabilité générale, en particulier chez les hommes avec une note de 7 (sur l'échelle de 1 à 9) correspond à une fréquence relative de 60 %.

Mots clés : Température non contrôlée, choucroute, fermentation lactique, chou pommé (*Brassica oleracea var. capitata*), bactéries lactiques, acide lactique, vitamine C, activités antioxydantes.

Abstract

The aim of this work is to evaluate the feasibility of spontaneous lactic fermentation of white cabbages (*Brassica oleracea var. capitata*) in the wilaya of Tizi-Ouzou under ambient conditions (uncontrolled temperature) for the preparation of sauerkraut. The temperature recorded during this process ranged between 15 °C and 23 °C, a range considered optimal for this type of fermentation. In addition to the increase in titratable acidity, calculated as lactic acid, lacto-fermentation led to a 173% increase in vitamin C content in the sauerkraut compared to its initial content in fresh cabbage. Thin-layer chromatography (CCM) analysis revealed the probable presence of lactic acid as the dominant organic acid. Regarding complementary chemical analyses (polyphenols, radical scavenging activity, and reducing power), the results showed a significant difference ($p \leq 0.05$) between fresh cabbage and sauerkraut in terms of polyphenol content and antioxidant activity, with a positive correlation between these two parameters. The final product demonstrated satisfactory microbiological quality, with a high presence of lactic acid bacteria (1.1×10^6 CFU/ml). Sensory evaluation revealed good overall acceptability, particularly among men, with a score of 7 (on a 1 to 9 scale), corresponding to a relative frequency of 60%.

Keywords: Uncontrolled temperature, sauerkraut, lactic fermentation, white cabbage (*Brassica oleracea var. capitata*), lactic acid bacteria, lactic acid, vitamin C, antioxidant activities.

مُلخَص :

يهدف هذا العمل إلى تقييم إمكانية التخمر اللبني للتقائي للكرنب الأبيض (*Brassica oleracea var. capitata*) في ولاية تيزي وزو في ظل الظروف المحيطة (درجة حرارة غير مضبوطة) من أجل تحضير الملفوف المخمر. تراوحت درجة الحرارة المسجلة خلال هذه العملية بين 15 و23 درجة مئوية، وهي درجة حرارة تُعتبر مثالية عمومًا لهذا النوع من التخمر. بالإضافة إلى زيادة الحموضة والمقدرة على شكل حمض اللاكتيك، سمح التخمر اللبني بزيادة قدرها 173% في محتوى فيتامين C في الملفوف المخمر مقارنة بمحتواه الأولي في الكرنب الطازج. أظهرت التحاليل باستخدام تقنية كروماتوغرافيا الطبقة الرقيقة (CCM) وجودًا مرجحًا لحمض اللاكتيك كحمض عضوي سائد. وبخصوص التحاليل الكيميائية التكميلية (متعددات الفينول، النشاط المضاد للجذور الحرة، والقدرة الاختزالية)، كشفت النتائج عن وجود فرق معنوي ($p \leq 0.05$) بين الكرنب الطازج والملفوف المخمر من حيث محتوى متعددات الفينول والنشاط المضاد للأكسدة، مع وجود ارتباط إيجابي بين هذين العاملين. أظهر المنتج النهائي جودة ميكروبيولوجية مرضية، مع وجود مرتفع لبكتيريا اللبنة (1.1×10^6 وحدة تكوين مستعمرات/مل). أما التقييم الحسي، فقد أظهر قبولًا جيدًا بشكل عام، لا سيما لدى الرجال، حيث حصل المنتج على درجة 7 (على سلم من 1 إلى 9)، وهو ما يعادل نسبة قدرها 60%.

الكلمات المفتاحية : درجة حرارة غير مضبوطة، الملفوف المخمر، التخمر اللبني، الكرنب الأبيض، بكتيريا حمض اللاكتيك، حمض اللاكتيك، الأنشطة المضادة، للأكسدة فيتامين C