



République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN SCIENCES BIOLOGIQUES

Spécialité: Biochimie Appliquée

Présentée par:

IZZA Yamna

Thème

**Evaluation des paramètres physicochimiques et
biochimiques du Blé fermenté Hamoum après
réfrigération pendant 5 ans.**

Soutenue le 29/06/2026

Devant le jury

Président	DJIBAOUI Rachid	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur	ARABI Abed	MCA	Université de Mostaganem
Encadreur	BENAKRICHE Ben Mhel	Professeur	Université de Mostaganem
Co-encadrante	AMEIR Leila	Doctorante	Université de Mostaganem

Année Universitaire: 2025-2026

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à **Dieu**, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Je Le remercie pour Son aide et Sa bénédiction tout au long de mon parcours universitaire

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, **M. Benakriche**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses orientations pertinentes et son accompagnement constant tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son soutien scientifique et ses encouragements ont été d'une grande importance pour l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à remercier la co-encadrante **Mme Ameir Leila** pour son aide précieuse dans l'obtention des résultats de ce travail. Sa disponibilité et son soutien.

Professeur **DJIBAOUI Rachid**, Professeur à l'Université de Mostaganem, à qui nous souhaitons exprimer notre gratitude d'avoir accepté de présider notre jury.

Docteur **ARABI Abed**, Maître de Conférences A, à l'université de Mostaganem, à qui nous souhaitons exprimer notre gratitude d'avoir accepté d'examiner notre jury.

Je tiens également à exprimer ma sincère gratitude à la professeure **HEIRECHE Fatima** pour son accueil chaleureux, sa présence constante et ses précieux conseils tout au long de ma formation. Son soutien et ses recommandations m'ont permis d'acquérir une expérience inestimable, tant sur le plan académique que professionnel.

J'exprime également ma profonde reconnaissance à Mme **BENJELLOUL Nour El Houda** pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer mon stage au sein du laboratoire Oravio. Je lui suis très reconnaissante pour sa confiance et pour les conditions favorables qu'elle a mises à ma disposition afin de mener à bien mon travail.

En fin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse, et qui m'ont apporté leur aide et leur soutien tout au long de mes études.

Que Dieu les bénisse abondamment.

Dédicaces

;

Je dédie ce modeste travail:

À ma très chère mère, celle qui m'a donné la vie, l'amour et la tendresse, et qui a toujours été mon soutien et ma force tout au long de mon parcours. Merci pour tes précieux conseils, ta patience, tes encouragements constants et tes prières qui m'ont accompagnée à chaque étape de ma vie. Tu as toujours cru en moi et m'as aidée à avancer avec confiance. Tout ce que j'ai pu accomplir aujourd'hui est le fruit de tes sacrifices, de ton dévouement et de ton amour inconditionnel. Tu es l'une des plus belles raisons de ma réussite. Je prie Allah de te préserver, de t'accorder une excellente santé, une longue vie et beaucoup de bonheur. Avec tout mon amour, mon respect et ma profonde gratitude.

À mon cher père, source de force et de fierté, pour son soutien, ses sacrifices et ses encouragements constants.

À mes chères sœurs, Amina et Houria, et à mon cher frère Salah Eddine, dont le soutien, les encouragements et l'affection ont toujours été une source de réconfort et de motivation, merci d'avoir été présents à mes côtés à chaque étape de ma vie. Je vous porte dans mon cœur avec toute ma reconnaissance et mon affection, et aussi à mes beaux-frères, Abbas et Hicham avec toute mon estime.

À mes neveux et nièces : Tadj Eddine, Seif Eddine, ma chère Sidra, Abdelmoujeb et la petite dernière Manar, que j'aime profondément et qui illuminent ma vie.

À ma chère grand-mère, la bénédiction de notre famille, source de sagesse, d'amour et de sérénité. Que Dieu la protège et lui accorde une longue vie.

À ma chère tante, que Dieu lui accorde Sa miséricorde, en reconnaissance de son amour et de sa place spéciale dans mon cœur.

À toute ma famille, sans exception.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de l'effet de la réfrigération à froid positif pendant cinq ans sur les propriétés physico-chimiques, biochimiques et microbiologiques du blé fermenté traditionnel de type Hamoum (BFH). Le blé, et particulièrement le blé dur, constitue une céréale essentielle dans l'alimentation humaine, mais il est sensible aux altérations durant le stockage. La fermentation traditionnelle en Matmora favorise le développement d'une microflore naturelle, principalement constituée de bactéries lactiques et de levures, conférant au produit des caractéristiques nutritionnelles et fonctionnelles spécifiques.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la stabilité du BFH après un stockage prolongé au froid et de comparer ses caractéristiques à celles du blé non fermenté et du blé fermenté initial. Les analyses réalisées portent sur les paramètres physico-chimiques (humidité, pH, acidité, lipides, protéines, fibres, glucides, activité de l'eau), biochimiques ainsi que microbiologiques.

Les résultats montrent que la fermentation entraîne des modifications significatives de la composition du blé, notamment une augmentation de l'acidité et des fibres, ainsi qu'une diminution du pH, des protéines et des glucides, traduisant l'activité métabolique des microorganismes fermentaires. En revanche, la réfrigération prolongée n'a pas provoqué de dégradation majeure des caractéristiques du produit.

Sur le plan microbiologique, les analyses ont révélé l'absence de germes pathogènes (*Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Bacillus cereus*) et le maintien d'une flore lactique et de levures, indiquant une bonne stabilité sanitaire et un potentiel fermentaire conservé.

En conclusion, la réfrigération à froid positif constitue une méthode efficace de conservation à long terme du blé fermenté Hamoum, permettant de préserver sa qualité nutritionnelle, sa sécurité microbiologique et ses propriétés fonctionnelles. Cette technique représente ainsi une approche intéressante pour la valorisation et la conservation des produits céréaliers fermentés traditionnels.

Mots clés : blé fermenté, Hamoum, réfrigération, fermentation, céréales, propriétés physico-chimiques, microbiologie.

Abstract

This work aims to investigate the effect of positive refrigeration over five years on the physicochemical, biochemical, and microbiological properties of traditional fermented wheat (Hamoum BFH). Wheat, particularly durum wheat, is one of the most important staple cereals in human nutrition; however, it is susceptible to deterioration during storage. Traditional fermentation in underground storage structures (Matmoras) promotes the development of a natural microflora mainly composed of lactic acid bacteria and yeasts, which gives the product specific nutritional and functional properties.

The main objective of this study is to evaluate the stability of fermented wheat after long-term cold storage and to compare its characteristics with those of non-fermented wheat and freshly fermented wheat. The analyses included physicochemical parameters (moisture, pH, titratable acidity, lipids, proteins, fibers, carbohydrates, water activity), as well as biochemical and microbiological assessments.

The results showed that fermentation induced significant changes in wheat composition, particularly an increase in acidity and dietary fiber content, and a decrease in pH, proteins, and carbohydrates, reflecting the metabolic activity of fermentative microorganisms. In contrast, long-term refrigeration did not cause major deterioration of product quality.

From a microbiological perspective, pathogenic microorganisms such as *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., and *Bacillus cereus* were absent, while lactic acid bacteria and yeasts persisted, indicating good sanitary stability and preservation of the fermentative potential of the product.

In conclusion, positive refrigeration appears to be an effective long-term preservation method for traditional fermented wheat (Hamoum), ensuring the maintenance of its nutritional value, microbiological safety, and functional properties. This technique represents a promising approach for the valorization and preservation of traditional fermented cereal products.

Keywords: fermented wheat, Hamoum, refrigeration, fermentation, cereals, physicochemical properties, microbiology.

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة تأثير خمس سنوات من التبريد الإيجابي على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيوكيميائية والميكروبيولوجية للقمح المخمر التقليدي من نوع حموم. يُعد القمح، وخاصة القمح القاسي، من الحبوب الأساسية في النظام الغذائي للإنسان، ولكنه عرضة للتلف أثناء التخزين. يُعزز التخمير التقليدي في مطبوعة نمو الميكروبات الطبيعية، التي تتكون أساسًا من بكتيريا حمض اللاكتيك والخمائر، مما يُكسب المنتج خصائص غذائية ووظيفية مميزة.

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تقييم استقرار القمح المخمر بعد تخزينه لفترة طويلة في التبريد، ومقارنة خصائصه بخصائص القمح غير المخمر والقمح المخمر في البداية. تركز التحليلات التي أُجريت على المعايير الفيزيائية والكيميائية (محتوى الرطوبة، ودرجة الحموضة، والحموضة، والدهون، والبروتينات، والألياف، والكربوهيدرات، ونشاط الماء)، والمعايير البيوكيميائية، والمعايير الميكروبيولوجية.

تُظهر النتائج أن التخمير يُحدث تغييرات ملحوظة في تركيبة القمح، لا سيما زيادة الحموضة والألياف، وانخفاض الرقم الهيدروجيني والبروتين والكربوهيدرات، مما يعكس النشاط الأيضي للكائنات الدقيقة المُخمّرة. في المقابل، لم يؤدِّ التبريد المطول إلى أي تدهور كبير في خصائص المنتج.

أما من الناحية الميكروبيولوجية، فقد كشفت التحليلات عن غياب الجراثيم الممرضة (الإشريكية القولونية، والسالمونيلا، والعصوية الشمعية) واستمرار وجود بكتيريا حمض اللاكتيك والخمائر، مما يدل على استقرار صحي جيد وحفاظ على قدرة التخمير.

وختامًا، يُعد التبريد البارد الإيجابي طريقة فعالة لحفظ قمح حموم المُخمّر على المدى الطويل، مما يسمح بالحفاظ على قيمته الغذائية وسلامته الميكروبيولوجية وخصائصه الوظيفية. وبالتالي، تُمثّل هذه التقنية نهجًا واعدًا لتعزيز قيمة منتجات الحبوب المُخمّرة التقليدية وحفظها.

الكلمات المفتاحية: قمح مخمر، حموم، تبريد، تخمير، حبوب، خصائص فيزيائية وكيميائية، علم الأحياء الدقيقة.

Liste des figures

Figures	Titres	Pages
01	Principe de fonctionnement du système de réfrigération pour la conservation des céréales (FrigorTec, 2024).	9
02	Structure du grain de blé D'après (<i>Surget A et Barron C, 2005</i>).	20
03	Le blé fermenté type Hamoum (a) et blé non fermenté (b).	17
04	photos d'une Matmora d'après Ameir L (2026).	28
05	Localisation géographique du lieu d'échantillonnage (Mazouna, Algérie) (36° 07' 32" Nord, 0° 52' 35" Est) (Google Maps).	28

Liste des tableaux

tableaux	Titres	Pages
01	Effets de la température sur la conservation des céréales stockées (Navarro et Noyes , 2001 ; Fleurat-Lessard , 2017).	15
02	Classification taxonomique du blé (Feillet P, 2000).	18
03	Les analyses organoleptique de BNF, BFH et BFH après réfrigération.	35
04	Caractéristiques physico-chimiques comparative de BNF, BFH et BFH après réfrigération.(*) Thèse de doctorat LMD Ameir L (2026).	40
05	Évaluation de l'analyse microbiologique.	42

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre 1: La réfrigération des céréales	
1. Généralités sur le stockage des céréales.....	3
1.1 Importance du stockage des céréales.....	3
1.2 Conditions de conservation des céréales.....	4
1.2.1 Température.....	4
1.2.2 Humidité.....	5
1.2.3 Ventilation et aération.....	5
1.2.4 Protection contre les microorganismes et les insectes.....	6
2.Principe de la réfrigération des céréales.....	6
2.1 Définition et objectifs.....	7
2.1.1 Définition de la réfrigération des céréales.....	7
2.1.2 Objectifs de la réfrigération.....	7
2.1.3 Importance de la réfrigération dans le stockage des céréales.....	8
2.2 Fonctionnement de la réfrigération.....	8
2.2.1 Principe général du fonctionnement.....	8
2.2.2 Effet du refroidissement sur les micro-organismes.....	9
2.2.3 Effet du stockage au froid positif sur les bactéries lactiques.....	10
2.2.4 Effet de la réfrigération sur les insectes et moisissures.....	10
3. Altérations des céréales au cours de la réfrigération.....	10
3.1 Altérations physicochimiques.....	11
3.1.1. Modification de l'humidité et de l'activité de l'eau.....	11
3.1.2 Altération de la texture et de la structure des grains.....	11
3.1.3 Oxydation des lipides.....	11
3.2 Altérations microbiologiques.....	12
3.2.1 Développement des micro-organismes psychrotrophes.....	12
3.2.2 Développement des moisissures.....	12
3.2.3 Production de mycotoxines.....	12
3.3 Modifications enzymatiques et biochimiques.....	13
3.3.1 Ralentissement de l'activité enzymatique.....	13
3.3.2 Modification de la respiration des grains.....	13
3.3.3 Changements biochimiques.....	13
3.4 Effets sur la valeur nutritionnelle.....	14
3.4.1 Conservation des nutriments.....	14
3.4.2 Dégradation partielle de certains composés.....	14
4. Facteurs influençant l'efficacité de la réfrigération.....	14
4.1 Température et humidité des grains.....	14
4.2 Conditions de stockage.....	16
Chapitre II: Le blé et le blé fermenté	
1.Généralité sur le blé.....	17
1.1 L'importance du blé	17

1.2 taxonomie et classification du blé	17
1.3 Composition morphologique.....	18
1.3.1 L'enveloppe	19
1.3.2. L'amande farineuse ou l'endosperme	19
1.3.3. Le germe	19
1.4.Composition physico-chimique et biochimique.....	20
1.4.1. Les glucides	20
1.4.2 Les protéines.....	20
1.4.2.1 Les protéines métaboliques	21
1.4.2.2 Les protéines de réserves.....	21
1.4.3 Les lipides	21
1.4.4 L'eau	21
1.4.5 Les vitamines et les minéraux	22
1.4.6 Les enzymes.....	22
1.4.7 Les polyphénols.....	22
2. fermentation du blé	22
2.1 La fermentation	22
2.2 Blé fermenté de type Hamoum.....	23
2.3 Les bactérie lactique	24
2.4.Les bienfaits de blé fermenté.....	25
Chapitre III: Matériels et méthodes	
1. Objectif	27
2. Le prélèvement.....	27
3. La zone de prélèvement.....	28
4. Principe et technique de chaque paramètres physicochimique et biochimique	29
4.1 détermination de pourcentage d'eau.....	29
4.2 Taux de cendres	29
4.3 Dosage des lipides totaux	30
4.4 Détermination de la teneur en protéines	30
4.5 Détermination de l'acidité titrable.....	31
4.6 Détermination du pH.....	32
4.7 Détermination du pourcentage des fibres totales ,solubles et insolubles	32
4.8 Glucides totaux	33
4.9 Activité de l'eau.....	33
4.10 la conductivité.....	34
5. Analyses Microbiologiques.....	34
Résultats et Discussion.....	35
Conclusion	44
Références Bibliographiques	

Introduction

Les céréales constituent l'un des principaux aliments de base de l'humanité. Parmi elles, le blé (*Triticum spp.*) occupe une place prépondérante grâce à sa richesse en glucides, protéines, vitamines et minéraux, ainsi qu'à sa grande capacité d'adaptation aux différentes conditions climatiques. Avec le riz et le maïs, il figure parmi les cultures les plus produites et consommées dans le monde (**Shiferaw et al., 2013 ; Shewry et Hey, 2015**). En Algérie, le blé dur (*Triticum durum*) représente une culture stratégique et constitue la matière première de nombreux produits traditionnels tels que le couscous, la semoule et les pâtes alimentaires (**Sissons M, 2008**).

Après la récolte, les grains demeurent exposés à diverses altérations physicochimiques, biochimiques et microbiologiques sous l'effet de la température, de l'humidité et de l'activité microbienne. Une conservation inadéquate peut entraîner des pertes importantes et affecter la qualité nutritionnelle et sanitaire des produits. La maîtrise du stockage constitue donc un enjeu majeur dans la préservation des céréales (**Kaleta A et Górnicki K, 2013 ; Zhao et al., 2023**).

Parmi les méthodes traditionnelles de conservation pratiquées en Algérie figure le stockage souterrain dans les Matmoras. Ce mode de conservation favorise le développement d'une microflore naturelle composée principalement de bactéries lactiques et de levures, à l'origine d'une fermentation spontanée du grain. Le produit obtenu, appelé blé fermenté de type Hamoum, présente des caractéristiques organoleptiques, nutritionnelles et microbiologiques particulières, notamment une acidification du milieu et la formation de métabolites bioactifs pouvant contribuer à la santé digestive (**Benakriche B.M et al., 2016**).

Des études antérieures ont montré que le BFH renferme une microflore diversifiée responsable de ses propriétés fonctionnelles et de sa stabilité microbiologique (**Benakriche B.M et al., 2016 ; Marco et al., 2021**). Toutefois, les connaissances relatives à son comportement lors d'un stockage prolongé demeurent limitées.

La réfrigération constitue actuellement l'une des méthodes de conservation les plus utilisées pour ralentir les réactions enzymatiques et limiter le développement des microorganismes indésirables. Elle contribue ainsi à préserver les qualités nutritionnelles et sanitaires des aliments (**Mannaa et Kim, 2017 ; Ziegler et al., 2021**). Cependant, un stockage prolongé peut également entraîner certaines modifications des propriétés physicochimiques et biochimiques du produit.

Dans ce contexte, notre étude consiste à évaluer l'effet de la conservation par réfrigération pendant cinq ans sur les propriétés physicochimiques, biochimiques et microbiologiques du blé fermenté traditionnel Hamoum. L'hypothèse retenue est que le froid positif permet de préserver les caractéristiques essentielles du produit tout en maintenant sa stabilité microbiologique.

L'objectif général de ce travail est de comparer les caractéristiques du BNF, du BFH et du BFH après cinq années de réfrigération afin d'apprécier l'efficacité du stockage au froid comme méthode de conservation à des fins industriels, pharmaceutiques et biotechnologiques.

Le présent mémoire s'articule autour de trois parties principales. La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique couvrant les généralités sur le blé et sa composition, les bases de la fermentation céréalière et le blé Hamoum, ainsi que les principes et les effets de la réfrigération sur les céréales. La deuxième partie décrit le matériel biologique utilisé, le protocole de prélèvement réalisé dans la commune de Mazouna (wilaya de Relizane), et l'ensemble des méthodes d'analyse physicochimiques, biochimiques et microbiologiques mises en œuvre. La troisième partie présente et discute les résultats obtenus à la lumière des données de la littérature scientifique, afin de porter un jugement rationnel sur l'efficacité de la réfrigération comme méthode de conservation du blé fermenté traditionnel Hamoum.

Partie Bibliographique

1. Généralités sur le stockage des céréales

1.1 Importance du stockage des céréales

Le stockage des céréales constitue une étape essentielle dans la chaîne de production agroalimentaire. Il permet d'assurer la disponibilité des grains après la récolte et de préserver leur qualité nutritionnelle, sanitaire et technologique jusqu'à leur transformation ou leur consommation.

Les céréales sont produites de manière saisonnière mais consommées tout au long de l'année. Ainsi, le stockage joue un rôle fondamental dans la sécurité alimentaire mondiale en assurant un équilibre entre la production et la consommation (**Serna-Saldivar S.O et García-Lara S, 2016**).

les céréales représentent une source majeure de glucides, protéines, vitamines, minéraux et fibres alimentaires nécessaires à l'alimentation humaine. Les auteurs soulignent également que la stabilité et la sécurité des stocks céréaliers sont indispensables au développement économique et social (**Zhao Y et al., 2023**).

Après la récolte, les grains restent biologiquement actifs et peuvent subir plusieurs phénomènes de détérioration sous l'effet des facteurs physiques, chimiques et biologiques. La dégradation des grains commence dès la récolte à cause des interactions entre l'humidité, la température et l'activité microbienne (**Kaleta A et Górnicki K, 2013**).

Le stockage vise principalement à :

- réduire les pertes post-récolte .
- maintenir la qualité physicochimique des grains .
- limiter le développement des insectes et microorganismes .
- préserver la valeur nutritionnelle .
- assurer l'approvisionnement continu des industries agroalimentaires.

Les pertes post-récolte représentent un problème majeur dans le monde. Les pertes quantitatives pendant le stockage peuvent atteindre 15 à

25 % dans certaines régions à cause des insectes, moisissures et mauvaises conditions de conservation .

Les microorganismes tels que *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.* et *Fusarium spp.* peuvent se développer durant le stockage et produire des mycotoxines dangereuses pour la santé humaine et animale (**Zhao Y et al., 2023**).

1.2 Conditions de conservation des céréales

La conservation des céréales dépend principalement de plusieurs facteurs environnementaux et technologiques tels que :

- la température.
- l'humidité.
- la durée de stockage.
- la ventilation.
- la présence d'oxygène.
- les conditions sanitaires des entrepôts.

Le maintien de conditions optimales est indispensable afin de limiter les phénomènes de détérioration des grains.

1.2.1 Température

La température est l'un des facteurs les plus importants dans la conservation des céréales. Une augmentation de température accélère :

- la respiration des grains.
- l'activité enzymatique.
- le développement des insectes.
- la prolifération des moisissures.

À l'inverse, les basses températures ralentissent les réactions biologiques et améliorent la stabilité des céréales durant le stockage. La température et l'humidité sont les principaux facteurs influençant la qualité des grains stockés .

La réfrigération constitue actuellement une technique efficace pour préserver les céréales en limitant les pertes post-récolte et en réduisant le développement microbien (**Ziegler V et al., 2021**).

1.2.2 Humidité

L'humidité des grains joue un rôle déterminant dans leur stabilité au stockage. Une humidité élevée favorise :

- la germination .
- la croissance des champignons.
- la production de mycotoxines.
- l'altération biochimique des grains.

Une humidité comprise entre 13 et 14 % est considérée optimale pour le stockage du blé et du maïs . Lorsque l'humidité devient trop importante, les moisissures deviennent les principaux agents de détérioration des céréales. Les espèces fongiques du genre *Aspergillus* peuvent se développer même à faible activité de l'eau et entraîner une contamination des grains stockés (**Kocić-Tanackov S et Dimić G, 2020**) .

1.2.3 Ventilation et aération

La ventilation permet de maintenir une température homogène dans les masses de grains et d'évacuer l'excès d'humidité. Une bonne aération réduit :

- les risques d'échauffement ;
- la condensation ;
- le développement des insectes et des moisissures.

Les techniques modernes de stockage utilisent des systèmes de ventilation, de réfrigération et d'atmosphère modifiée afin d'améliorer la conservation des céréales (**Pekmez H, 2016**).

1.2.4 Protection contre les microorganismes et les insectes

Les insectes et les microorganismes constituent les principales causes de détérioration des céréales stockées. Les grains doivent être conservés dans des structures propres, sèches et hermétiques afin d'éviter toute contamination.

Les principaux insectes responsables des pertes des céréales stockées sont :

- *Rhyzopertha dominica* ;
- *Sitophilus zeamais* ;
- *Tribolium castaneum* .

Les champignons tels que *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.* et *Fusarium spp.* représentent une menace importante pour la sécurité sanitaire des céréales stockées (Zhao Y et al., 2023).

2.Principe de la réfrigération des céréales

La réfrigération des céréales est une méthode moderne de conservation utilisée pour maintenir la qualité des grains durant le stockage. Elle consiste à abaisser artificiellement la température des céréales afin de ralentir les réactions biologiques et biochimiques responsables de leur détérioration. Cette technique permet principalement de limiter la respiration des grains, le développement des insectes, des moisissures et des micro-organismes, tout en préservant les propriétés nutritionnelles et technologiques des céréales.

Les produits céréaliers conservés sous réfrigération présentent une meilleure stabilité microbiologique et une meilleure conservation de leurs propriétés fermentaires comparativement aux produits congelés.

2.1 Définition et objectifs

2.1.1 Définition de la réfrigération des céréales

La réfrigération des céréales est une technique de conservation basée sur le maintien des grains à basse température, généralement autour de 5 à 15°C, afin de ralentir les phénomènes de dégradation biologique. Le refroidissement agit principalement sur l'activité métabolique des micro-organismes et des insectes responsables des pertes post-récolte.

Les études montrent que le stockage à basse température permet de maintenir une meilleure viabilité microbiologique et de préserver les qualités fermentaires des produits céréaliers. Les cultures conservées à 5°C demeuraient viables pendant 90 jours avec une activité fermentaire satisfaisante (**Mukisa I.M et al., 2020**).

2.1.2 Objectifs de la réfrigération

La réfrigération des céréales a pour principal objectif d'assurer une conservation prolongée des grains tout en limitant leur détérioration. Les objectifs essentiels de cette technique sont :

- réduire la respiration des grains ;
- ralentir le développement des insectes ;
- limiter la croissance des moisissures ;
- réduire la production de mycotoxines ;
- préserver les qualités nutritionnelles et organoleptiques ;
- prolonger la durée de stockage.

Les basses températures diminuent fortement le développement des champignons producteurs de mycotoxines dans les céréales stockées. Les auteurs soulignent également que la réduction de la température et de l'activité de l'eau améliore significativement la stabilité des grains durant le stockage (**Mannaa M et Kim K.D., 2017**).

2.1.3 Importance de la réfrigération dans le stockage des céréales

La réfrigération constitue une alternative importante aux traitements chimiques utilisés dans les silos. Elle permet de réduire l'utilisation des insecticides et des fumigants tout en améliorant la sécurité sanitaire des céréales stockées.

Cette technique est particulièrement efficace dans les régions chaudes où les températures élevées favorisent rapidement le développement des insectes et des moisissures. Le refroidissement des grains contribue ainsi à maintenir une meilleure qualité technologique et sanitaire des céréales durant le stockage (Ziegler V et *al.*, 2021).

2.2 Fonctionnement de la réfrigération

2.2.1 Principe général du fonctionnement

Le principe de la réfrigération repose sur la circulation d'air froid à travers la masse de grains stockés. L'air refroidi est produit par un système frigorifique puis injecté dans les silos grâce à des ventilateurs. Cet air traverse les grains et absorbe leur chaleur, ce qui entraîne une diminution progressive de leur température.

Le refroidissement homogène des grains permet d'éviter la formation de zones chaudes et de condensation favorables au développement des moisissures et des insectes (Navarro S et Noyes R.T., 2001).

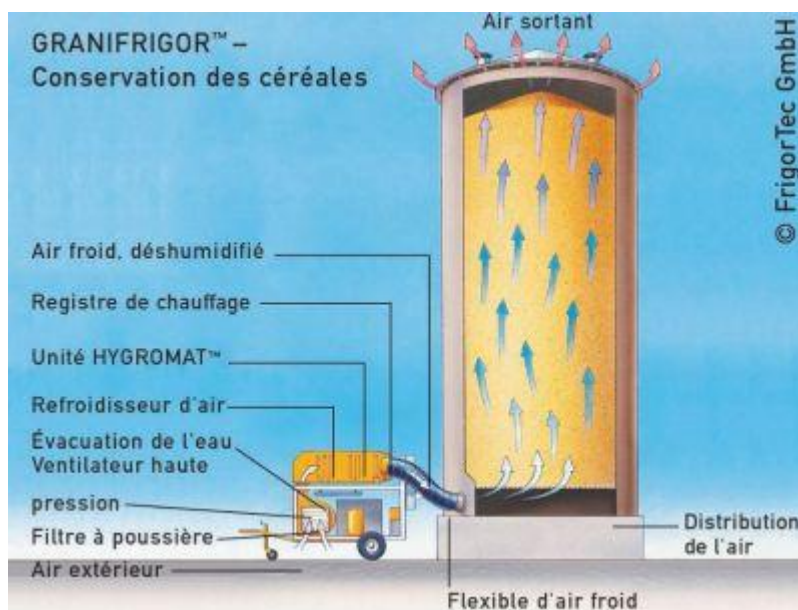


Figure 01: Principe de fonctionnement du système de réfrigération pour la conservation des céréales (FrigorTec, 2024).

2.2.2 Effet du refroidissement sur les micro-organismes

Les basses températures réduisent considérablement l'activité métabolique des bactéries, levures et moisissures. Mukisa et al. ont montré que les cultures conservées à 5°C présentaient une meilleure viabilité et une meilleure activité fermentaire que celles conservées à -18°C.

Les auteurs expliquent que les faibles températures limitent les dommages cellulaires et permettent une meilleure conservation des micro-organismes utiles. À l'inverse, la congélation peut provoquer des lésions cellulaires dues à la formation de cristaux de glace (Mukisa I.M et al., 2020).

2.2.3 Effet du stockage au froid positif sur les bactéries lactiques

Le stockage au froid positif permet de préserver les bactéries lactiques présentes dans le blé fermenté. Ces bactéries jouent un rôle important dans la fermentation grâce à la production d'acide lactique, ce qui améliore la qualité microbiologique et nutritionnelle du produit.

Les basses températures ralentissent le développement des micro-organismes indésirables tout en maintenant l'activité des bactéries lactiques. Ainsi, la réfrigération contribue à conserver les propriétés fermentaires du blé fermenté durant le stockage (Mukisa I.M et *al.*, 2020).

2.2.4 Effet de la réfrigération sur les insectes et moisissures

La diminution de la température ralentit fortement le développement des insectes de stockage ainsi que la croissance des moisissures responsables de la production de mycotoxines. Les températures basses réduisent la respiration des insectes, limitent leur reproduction et diminuent leur activité métabolique.

Les températures élevées associées à une forte humidité favorisent la croissance des champignons toxigènes, tandis que le refroidissement des grains permet de limiter leur développement et la production de mycotoxines (Mannaa M et Kim K.D., 2017).

3. Altérations des céréales au cours de la réfrigération

La réfrigération est une méthode largement utilisée pour conserver les céréales durant le stockage. Bien qu'elle permette de ralentir plusieurs phénomènes de détérioration, certaines altérations physicochimiques, microbiologiques et biochimiques peuvent néanmoins apparaître au cours du stockage réfrigéré. Ces modifications dépendent principalement de la température, de l'humidité, de la durée de conservation et des caractéristiques initiales des grains.

Les conditions de température et d'activité de l'eau influencent fortement la stabilité des céréales ainsi que le développement des micro-organismes durant le stockage (**Mannaa M et Kim K.D., 2017**).

3.1 Altérations physicochimiques

3.1.1. Modification de l'humidité et de l'activité de l'eau

Au cours de la réfrigération, les variations de température peuvent provoquer des phénomènes de condensation à la surface des grains. Cette humidité favorise l'augmentation de l'activité de l'eau, ce qui peut accélérer certaines réactions de dégradation et favoriser le développement microbien.

L'activité de l'eau constitue un facteur essentiel dans la stabilité des céréales stockées. Une augmentation de cette activité stimule la croissance des moisissures et accélère la détérioration des grains (**Magan, N et Lacey J., 1988**).

3.1.2 Altération de la texture et de la structure des grains

Les changements thermiques provoqués par la réfrigération peuvent modifier la structure interne des céréales. Les cycles de refroidissement et de réchauffement peuvent entraîner des fissures dans les grains, une modification de leur texture ainsi qu'une diminution de leur qualité technologique.

Les variations de température et d'humidité influencent fortement les propriétés physiques des grains durant le stockage (**Ziegler V et al., 2021**).

3.1.3 Oxydation des lipides

Même à basse température, certaines réactions d'oxydation des lipides peuvent se produire dans les céréales riches en matières grasses. Cette oxydation entraîne la formation de composés responsables du rancissement et de la détérioration sensorielle des grains.

La réfrigération ralentit ces réactions mais ne les élimine pas totalement, particulièrement lorsque la durée de stockage est prolongée (**Fleurat-Lessard, F, 2017**).

3.2 Altérations microbiologiques

3.2.1 Développement des micro-organismes psychrotrophes

Certaines bactéries et moisissures appelées psychrotrophes sont capables de se développer à basse température. Même sous réfrigération, ces micro-organismes peuvent provoquer une détérioration progressive des céréales stockées.

Les genres fongiques tels que *Penicillium* et certaines espèces d'*Aspergillus* peuvent survivre dans des conditions réfrigérées lorsque l'humidité reste élevée (Mannaa M et Kim K.D., 2017).

3.2.2 Développement des moisissures

Les moisissures représentent l'un des principaux risques microbiologiques dans les céréales réfrigérées lorsque l'humidité est mal contrôlée. Leur croissance peut entraîner une dégradation de la qualité sanitaire et nutritionnelle des grains.

L'humidité et la température constituent les principaux facteurs influençant le développement des moisissures dans les céréales stockées (Magan, N et Lacey J., 1988).

3.2.3 Production de mycotoxines

Certaines moisissures présentes dans les céréales réfrigérées peuvent produire des mycotoxines lorsque les conditions de stockage deviennent favorables. Ces substances toxiques représentent un risque important pour la santé humaine et animale.

La maîtrise simultanée de la température et de l'humidité est donc indispensable pour limiter ce risque (Fleurat-Lessard, F, 2017).

3.3 Modifications enzymatiques et biochimiques

3.3.1 Ralentissement de l'activité enzymatique

La réfrigération ralentit les réactions enzymatiques responsables de la dégradation des céréales. Les enzymes impliquées dans l'hydrolyse des protéines, des lipides et des glucides voient leur activité diminuer à basse température.

Cette réduction enzymatique contribue à prolonger la durée de conservation des grains (Ziegler V et *al.*, 2021).

3.3.2 Modification de la respiration des grains

Les grains restent biologiquement actifs après la récolte et continuent à respirer durant le stockage. La respiration entraîne une consommation d'oxygène et une production de chaleur.

La réfrigération permet de ralentir ce métabolisme respiratoire, limitant ainsi les pertes de matière sèche et l'échauffement des céréales (Navarro S et Noyes R.T., 2001).

3.3.3 Changements biochimiques

Les réactions biochimiques liées au métabolisme cellulaire sont ralenties sous l'effet des basses températures. Toutefois, certaines modifications des protéines et des lipides peuvent apparaître durant un stockage prolongé.

Ces changements peuvent influencer les propriétés technologiques des céréales, notamment leur aptitude à la mouture et à la transformation (Kaleta A et Górnicki K., 2013).

3.4 Effets sur la valeur nutritionnelle

3.4.1 Conservation des nutriments

La réfrigération permet généralement de préserver les qualités nutritionnelles des céréales en ralentissant les réactions de dégradation. Les pertes en protéines, glucides et vitamines sont moins importantes à basse température.

Les produits céréaliers conservés sous réfrigération présentent une meilleure stabilité biologique et conservent davantage leurs propriétés initiales (Mukisa I.M et *al.*, 2020).

3.4.2 Dégradation partielle de certains composés

Malgré les effets protecteurs de la réfrigération, certaines vitamines et composés sensibles peuvent subir une dégradation progressive durant un stockage prolongé. Les réactions d'oxydation des lipides peuvent également diminuer la qualité nutritionnelle et sensorielle des grains (Fleurat-Lessard F, 2017).

4. Facteurs influençant l'efficacité de la réfrigération

L'efficacité de la réfrigération des céréales dépend principalement de plusieurs facteurs liés aux caractéristiques des grains et aux conditions de stockage. Une bonne maîtrise de ces paramètres permet d'améliorer la conservation des céréales et de limiter les pertes post-récolte.

4.1 Température et humidité des grains

La température et l'humidité constituent les principaux facteurs influençant la qualité des céréales durant le stockage. Les basses températures ralentissent la respiration des grains ainsi que le développement des insectes et des moisissures. À l'inverse, une humidité élevée favorise la croissance microbienne et la production de mycotoxines.

La réduction simultanée de la température et de l'activité de l'eau améliore considérablement la stabilité des grains stockés (**Mannaa M et Kim K.D., 2017**).

Tableau 01: Effets de la température sur la conservation des céréales stockées (**Navarro et Noyes , 2001 ; Fleurat-Lessard , 2017**).

Palier de température	Effets principaux sur la conservation des céréales	Conséquences sur les nuisibles et risques
05°C	Conservation optimale à long terme. (Recommandé pour les semences)	Arrêt total de la germination. Risque de condensation si le grain est trop humide.
05°C à 12°C	Seuil de stockage de sécurité. (Idéal pour l'automne/hiver)	Les insectes entrent en léthargie et cessent de se reproduire. Les moisissures sont inhibées.
12°C à 15°C	Seuil de refroidissement initial. (Indispensable post-récolte)	Ralentissement de l'activité biologique. Permet d'attendre les conditions pour le palier inférieur.
15°C à 20°C	Zone de vigilance.	Ralentit l'activité respiratoire du grain et limite l'échauffement spontané.
20°C	Zone à risque élevé.	Reprise rapide de l'activité respiratoire, développement exponentiel des insectes et risques de moisissures.

4.2 Conditions de stockage

Les conditions de stockage jouent un rôle important dans l'efficacité de la réfrigération. Une bonne ventilation permet de maintenir une température homogène dans les masses de grains et de réduire les risques de condensation et d'échauffement.

La durée de stockage, l'hygiène des installations ainsi que la qualité initiale des grains influencent également la stabilité des céréales durant la conservation.

Des grains propres, secs et correctement ventilés présentent une meilleure résistance aux phénomènes de détérioration (**Ziegler V et al., 2021**).

1. Généralité sur le blé

1.1 L'importance du blé

Le blé est l'une des céréales les plus importantes et les plus cultivées dans le monde. Il appartient au genre *Triticum*, à la famille des Poaceae et constitue une plante monocotylédone autogame largement adaptée à diverses conditions climatiques (Shewry P.R, 2009).

Grâce à sa grande capacité de production et à sa valeur nutritionnelle élevée, le blé joue un rôle fondamental dans la sécurité alimentaire mondiale. Il représente l'une des principales sources d'énergie et de protéines pour l'alimentation humaine et constitue, avec le riz et le maïs, l'une des trois céréales les plus consommées dans le monde (Shiferaw B et al., 2013).

Le blé est particulièrement apprécié pour sa richesse en glucides, en protéines, ainsi qu'en vitamines, minéraux et composés bioactifs. Sa facilité de récolte, de stockage, de transport et de transformation explique sa large utilisation dans la fabrication de nombreux produits alimentaires tels que le pain, les pâtes alimentaires, le couscous et la semoule (Shewry P.R et Hey S.G, 2015).

Parmi les espèces cultivées, le blé dur (*Triticum Durum*) occupe une place importante, notamment dans les pays méditerranéens, où il constitue la principale matière première utilisée pour la production de semoule et de pâtes alimentaires (Sissons M, 2008).

1.2 taxonomie et classification du blé

Le blé est une monocotylédone qui appartient au genre *Triticum* de la famille des Gramineæ. C'est une céréale dont le grain est un fruit sec et indéhiscant, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments. Le blé est caractérisé par des critères morphologiques particuliers (chaume - épillet - présence de scutellum...). Il est composé de deux espèces : le blé dur *Triticum durum*, un tétraploïde au génome de type AABB, composé de 28 chromosomes ($2n=4x=28$), et le blé tendre *Triticum aestivum*, un hexaploïde au génome de

type AABB DD, composé de 42 chromosomes ($2n=6x=42$)(Feillet P, 2000). Les climats méditerranéens favorisent la) culture du blé dur, qui est la céréale la plus cultivée en Algérie (Boudreau A et Menard J, 1992 ; Fredot F, 2005).

Tableau 02: Classification taxonomique du blé (Feillet P, 2000).

Rang taxonomique	Classification
Règne	Plantae
Embranchement	Magnoliophyta (Angiospermes)
Classe	Liliopsida (Monocotylédones)
Ordre	Poales
Famille	Poaceae (Graminées)
Genre	Triticum
Espère (Blé Dur)	<i>Triticum durum</i> Desf.
Espèce (blé tendre)	<i>Triticum aestivum</i> L.

1.3 Composition morphologique

Morphologiquement le blé dur se différencie du blé tendre (Olmedo O.A, 1995 ; Soltner D, 2005). Le grain de blé dur est gros, de section triangulaire très riche en albumen et de texture vitreuse (Soltner, 2005 ; Hadria R, 2006). Il possède un système racinaire assez développé par rapport à celui du maïs ou graminées (Prats J et Grandcourt M.C, 1971 ; Soltner D, 2005 ; Hadria R, 2006).

Physiologiquement, le grain est constitué par le germe qui donne la plantule, l'amande appelée endosperme ou albumen, tissu de stockage qui fournit au germe les réserves nécessaires pour sa croissance et les enveloppes protectrices ou son, composées par la paroi de la graine (testa) et par la paroi du fruit (péricarpe) (Doumandji A et al., 2003). La structure des grains de diverses céréales est assez semblable.

1.3.1 L'enveloppe

C'est la pellicule cellulosique qui protège le grain pendant sa formation dans l'épi, au cours de sa conservation et aussi pendant la levée, dans le sol en limitant l'entrée des Moisissures et des bactéries. Toutefois le péricarpe n'est pas étanche et permet le passage de l'air et de l'eau (**Cruz J.F et al., 1988**).

L'enveloppe représente environ 12 à 14% du poids du grain de blé (**Bonneau L, 2003**), elle est formée ; du péricarpe riche en fibres cellulosique et sels minéraux et d'une assise protéique ou couche à aleurone qui représente la première assise constitutive de l'albumen, riche en protéines, lipides, pentosanes, hémicellulose et minéraux (**Goldon D et Willm G, 1991**).

1.3.2. L'amande farineuse ou l'endosperme

constitue la majeure partie du grain de blé et représente environ 80 à 85 % de son poids total. Elle est principalement composée de grains d'amidon enchâssés dans une matrice protéique et renferme l'essentiel des réserves énergétiques nécessaires au développement de l'embryon lors de la germination (**Shewry P. R et Hey S.J., 2015**)

1.3.3. Le germe

Le germe constitue la partie vivante du grain de blé. Il comprend deux parties principales : l'axe embryonnaire, qui donnera naissance à la future plante, et le scutellum (cotylédon), qui joue un rôle de réserve nutritive destinée au développement de l'embryon. Bien qu'il ne représente qu'environ 2 à 3 % du poids total du grain, le germe renferme une grande partie des lipides, ainsi que des protéines, des vitamines et des composés bioactifs d'intérêt nutritionnel (**Khalid A et al., 2023**).

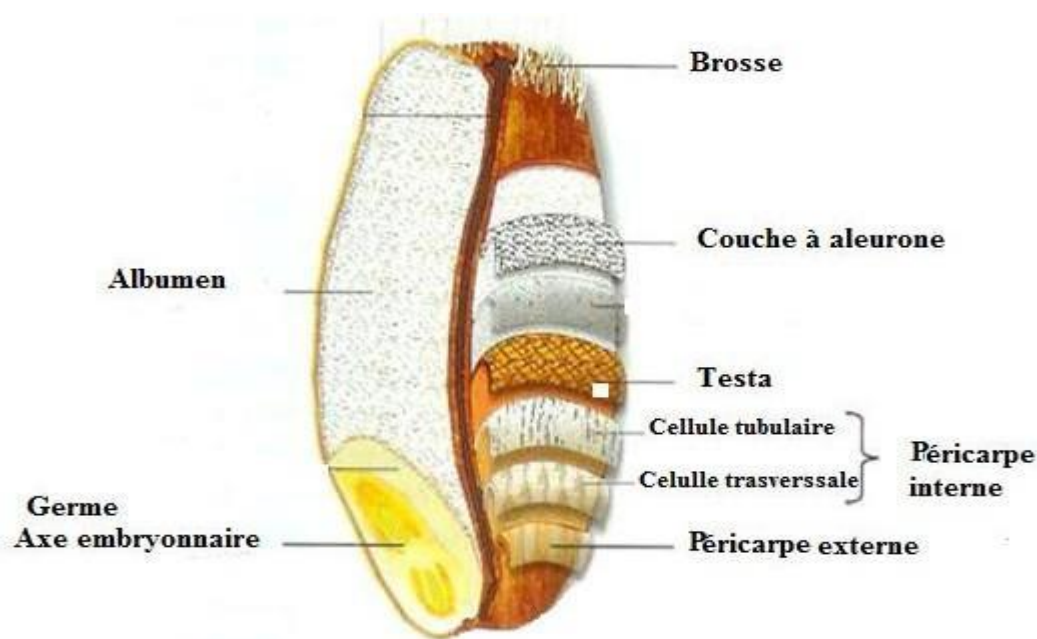


Figure 02: Structure du grain de blé D'après (*Surget A et Barron C, 2005*).

1.4.Composition physico-chimique et biochimique

1.4.1. Les glucides

Les glucides présentent 60 à 80 % de la matière sèche du grain de blé. L'amidon est le glucide principal trouvé dans l'albumen, les sucres (oses, dioses et trioses) sont présents dans le germe, et les glucides des enveloppes sont principalement, la cellulose et l'hémicellulose et les pentosanes (**Dunford N.T, 2012**).

1.4.2 Les protéines

Le blé est considéré comme une source importante de protéines pour l'alimentation humaine (**Battais F et al., 2007**). Les protéines de réserve représentent 80 à 95 % des protéines du blé et forment ensemble le gluten ; le reste est constitué par d'autres types de protéines (**Roudaut H et Lefrancq E, 2005**).

1.4.2.1 Les protéines métaboliques

Les albumines et globulines sont solubles dans l'eau et dans les solutions salines, elles représentent 15 à 20 % des protéines présentes dans la farine de blé. Ce groupe de protéines est très diversifié par ses propriétés physicochimiques. Ces protéines participent à la formation du grain et à l'accumulation des réserves dans l'albumen (**Vensel W H *et al.*, 2005**).

1.4.2.2 Les protéines de réserves

Les protéines de réserve du blé appartiennent principalement au groupe des prolamines et sont constituées d'un mélange complexe de protéines. Elles comprennent, d'une part, les gliadines, qui sont des protéines monomériques solubles dans les solutions hydroalcooliques, et, d'autre part, les gluténines, qui sont des protéines polymériques formées de sous-unités reliées par des ponts disulfure. Ces dernières sont insolubles dans les solvants aqueux mais peuvent être solubilisées en présence d'agents réducteurs appropriés. Les gliadines et les gluténines constituent les principaux composants du gluten et sont responsables des propriétés viscoélastiques de la pâte de blé (**Khalid A *et al.*, 2023**).

1.4.3 Les lipides

Les lipides sont peu abondants et inégalement distribués dans le grain, 8-11 % d'eux sont présents surtout au niveau du germe. Les principales matières grasses du blé sont des acides gras insaturés, des glycérides simples des glycolipides et des phospholipides (**Feillet P, 2000**).

Autres composants

1.4.4 L'eau

Le grain de blé est naturellement un peu hydraté, sa teneur en eau varie avec le taux d'humidité de l'air. L'équilibre se situe entre 13 et 15 %. Du point de vue chimique et physique, son action solvant favorise les réactions enzymatiques et les attaques microbiennes (**Feillet P, 2000**).

1.4.5 Les vitamines et les minéraux

Les grains renferment une quantité importante de vitamines du groupe B à l'exception de la vitamine B12. La teneur en vitamines liposolubles des gains est faible. Les grains sont dépourvus de vitamines D et A. Seul le germe présente une richesse relative en vitamine E (**Vierling E, 2008**).

Les minéraux formant une petite partie du grain de blé, et en proportion encore plus faible dans l'album en moins de 1 %. Le blé contient du fer, du magnésium, du Manganèse, du Cuivre et du zinc. Ces constituants sont distribués principalement dans les couches extérieures et dans le germe (**Manay N et Shadaksharaswamy M, 2001**).

1.4.6 Les enzymes

Les enzymes des grains de blé sont des protéines qui exercent une activité catalytique spécifique d'un très grand nombre de réactions chimiques. Leur fonctionnement est contrôlé par des principaux facteurs du milieu tels que la température, le pH et l'activité de l'eau (**Feillet P, 2000**).

1.4.7 Les polyphénols

Les polyphénols sont des métabolites secondaires que les plantes produisent pour se protéger contre d'autres organismes (**Tsao R, 2010**). Ils ont en commun un noyau benzénique portant au moins un groupement hydroxyle. Ils comprennent essentiellement les phénols simples, les acides phénoliques, les flavonoïdes, les tanins, et lignines (**Martin S et Andrantsitohaina R, 2002**).

2. fermentation du blé

2.1 La fermentation

La fermentation est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus économiques utilisées pour la conservation des aliments. Elle est particulièrement répandue dans les régions tropicales, où les conditions de température et d'humidité élevées favorisent les fermentations spontanées (**Nout M.J.R, 2009**).

Par ailleurs, le stockage souterrain des céréales dans des greniers traditionnels appelés « Matmora » représente une pratique ancienne de conservation utilisée dans plusieurs régions du bassin méditerranéen. Les conditions de stockage régnant dans ces structures favorisent la préservation des grains et peuvent également induire certaines transformations biochimiques et microbiologiques au cours de la période de conservation **(Pasqualone A, 2025)**.

Au cours de la conservation du blé, diverses transformations biochimiques peuvent survenir et entraîner des modifications de sa valeur nutritionnelle, notamment au niveau des glucides, des protéines, des lipides et des vitamines **(Rehman Z.U, 2006)**.

Ce processus de fermentation est principalement lié à l'activité enzymatique et microbienne, en particulier celle des bactéries lactiques, qui jouent un rôle essentiel dans les transformations des constituants du grain **(Mensah P, 1997)**.

2.2 Blé fermenté de type Hamoum

En Algérie, le Hamoum constitue un aliment traditionnel obtenu à partir de blé fermenté et généralement consommé sous forme de couscous. Sa production repose sur un processus de fermentation naturelle réalisé dans un grenier souterrain traditionnel appelé « Matmora », où les grains de blé sont stockés pendant une période prolongée, favorisant ainsi le développement d'une microflore spécifique **(Benakriche B.M et al., 2016)**.

Grâce à ce mode de fermentation spontané, le Hamoum renferme une importante flore microbienne endogène, composée notamment de microorganismes bénéfiques susceptibles de contribuer à ses qualités nutritionnelles et fonctionnelles **(Drabo et al., 2019)**.

2.3 Les bactérie lactique

Les bactéries lactiques constituent un groupe de microorganismes procaryotes, hétérotrophes et chimio-organotrophes, capables d'utiliser les composés organiques comme source d'énergie. Elles se caractérisent principalement par leur aptitude à produire de l'acide lactique à partir de la fermentation des glucides **(Roissart H, 1986)**.

Ces bactéries jouent un rôle essentiel dans les procédés de fermentation alimentaire. En effet, elles contribuent à l'amélioration des caractéristiques organoleptiques des produits fermentés, notamment l'arôme, la texture et la saveur. Elles participent également à la sécurité microbiologique des aliments grâce à la production d'acides organiques et d'autres composés antimicrobiens capables d'inhiber le développement des microorganismes indésirables **(Yao A.A et al., 2009)**.

Certaines souches de bactéries lactiques sont reconnues comme probiotiques et présentent des effets bénéfiques sur la santé humaine. Elles peuvent contribuer à la stimulation du système immunitaire en favorisant l'activité des cellules de défense telles que les phagocyte et les lymphocytes **(Cross M.L et al., 2001 ; Gourbeyre P et al., 2011)**. Elles participent également au maintien de l'intégrité de la muqueuse intestinale en stimulant la production de mucus protecteur **(Vieira B et al., 2016)**.

Par ailleurs, plusieurs études ont suggéré que certaines souches probiotiques pourraient exercer un effet protecteur contre diverses pathologies grâce à leurs propriétés antioxydantes et à leur capacité à produire des métabolites bioactifs. Elles ont également montré une efficacité dans la prévention ou la réduction de certains épisodes diarrhéiques, notamment pour les souches *Lactobacillus acidophilus* et *Lactobacillus casei* **(Commane D.M et al., 2005 ; Pennar R et al., 2005)**.

2.4. Les bienfaits de blé fermenté

Le BFH est un aliment traditionnel obtenu par fermentation naturelle du blé grâce à l'action d'une flore microbienne endogène. Cette fermentation confère au produit des propriétés nutritionnelles et fonctionnelles susceptibles de contribuer au maintien de la santé intestinale et au bon fonctionnement des mécanismes physiologiques du tube digestif. Des études ont montré que le BFH pourrait être utilisé comme complément nutritionnel dans la prévention des septicémies associées à la translocation bactérienne intestinale chez les enfants souffrant de malnutrition (**Benakriche B.M et al., 2017**).

Par ailleurs, la supplémentation en BFH a permis de réduire significativement la translocation bactérienne intestinale et d'améliorer la restructuration de la barrière muqueuse au cours de la phase de réalimentation chez des rats malnutris, mettant ainsi en évidence son potentiel bénéfique sur la santé digestive (**Benakriche B.M et al., 2016**).

D'une manière générale, les aliments fermentés suscitent un intérêt croissant en raison de leurs effets positifs sur la santé. Plusieurs études ont rapporté leur implication dans la prévention ou l'amélioration de diverses affections métaboliques telles que l'obésité, le syndrome métabolique, le diabète, les maladies cardiovasculaires et l'hypertension (**Lortal S et al., 2020**).

Les produits fermentés renferment également différents composés bioactifs, notamment des substances antimicrobiennes, des peptides bioactifs et des composés antioxydants pouvant exercer des effets protecteurs contre le stress oxydatif, les réactions allergiques et certains microorganismes pathogènes. De plus, les microorganismes probiotiques présents dans ces aliments contribuent au maintien de l'équilibre du microbiote intestinal et participent au renforcement de la barrière intestinale contre des agents pathogènes tels que *Salmonella* spp. et *Escherichia coli* (**Levy J, 2022**).

La consommation régulière d'aliments fermentés peut favoriser une meilleure digestion, soutenir la réponse immunitaire et contribuer à la réduction du risque de certaines maladies chroniques, notamment le diabète de type 2 et les maladies cardiovasculaires (**Jennings C et Vetter V, 2024**).

Matériels et Méthodes

1.Objectif

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les modifications des propriétés physico-chimiques du blé fermenté de type Hamoum après conservation par réfrigération pendant 05 ans, afin d'évaluer l'effet du stockage pendant le froid positif sur la qualité nutritionnelle et la stabilité du produit. Cette étude vise également à vérifier si le produit a conservé ses caractéristiques initiales ou s'il a subi des modifications au cours du stockage au froid. Enfin, ce travail permet d'évaluer l'efficacité de la réfrigération comme méthode de conservation du blé fermenté traditionnel Hamoum à l'échelle industrielle.

2.Le prélèvement

Après un stockage traditionnel d'une période de 12 mois à partir de la date de récolte. Le blé fermenté et le blé non fermenté (**figure 03**) a été prélevé de Matmora(**figure 04**) dans des conditions aseptiques et hygiéniques, le prélèvement a été réalisé dans des conditions stériles puis conservé dans des pots stériles afin d'éviter toute contamination. Le BFH a été prélevé dans la partie périphérique de la Matmora en contact avec le sol, par contre le BNF a été prélevée dans la partie centrale du grenier .



Figure 03 : le blé fermenté type Hamoum (a) et blé non fermenté (b)



Figure 04: photos d'une Matmora d'après Ameir L (2026).

3.La zone de prélèvement



Figure 05: Localisation géographique du lieu d'échantillonnage (Mazouna, Algérie)
(36° 07' 32" Nord, 0° 52' 35" Est) (Google Maps).

4.Principe et technique de chaque paramètres physicochimique et biochimique

4.1 détermination de pourcentage d'eau

La teneur en eau des échantillons est déterminée par la méthode de dessiccation, selon le protocole décrit par **Audigie C.L *et al.* (1980)**. Cinq grammes de chaque échantillon est déposé dans un creuset porcelaine, préalablement pesé et placé dans une étuve (NUVE EN 400, Turquie) à 105°C, pendant 5 h. Le creuset est ensuite mis dans un dessiccateur avant d'être pesé à l'aide d'une balance analytique (Kern ALS 220-4, Allemagne). Le pourcentage d'eau est déterminé selon la formule ci-dessous :

$$\text{Humidité (\%)} = [(M1-M2) / (M1-M0)] \times 100$$

M0 : Masse du creuset vide (g).

M1 : Masse du creuset et de l'échantillon avant séchage (g).

M2 : Masse du creuset et de l'échantillon après séchage (g).

4.2 Taux de cendres

Le taux de cendres (sels minéraux) est estimé selon la méthode décrite par **Audigie C.L *et al.* (1980)**, qui est basée sur la destruction totale de toutes matière organique sous l'effet de l'incinération à haute température, suivie de la pesée du résidu minéral. Pour cela, cinq grammes de chaque échantillon sont placés dans un creuset en porcelaine, puis incinérés dans un four à moufle (Stuart BIBBY, UK) à 550°C pendant 5h, jusqu'à obtention de cendres de couleur blanches. Le creuset contenant les cendres est ensuite placé dans un dessiccateur pour refroidissement, puis pesé immédiatement. Le pourcentage des sels minéraux est évalué à partir de la formule suivante :

$$\text{Taux de cendres (\%)} = [(M2-M0) / (M1-M0)] \times 100$$

M0 : Masse du creuset vide (g).

M1 : Masse du creuset et de l'échantillon (g).

M2 : Masse du creuset et des cendres (g).

4.3 Dosage des lipides totaux

Les lipides totaux sont dosés par la méthode de Soxhlet, telle est décrite dans le Journal Officiel des Communautés Européennes n° L.279/17. Cette méthode correspond à la NF V03-713/1984, ISO 7302/1982. Il s'agit d'une méthode gravimétrique, basée sur la pesée de l'échantillon initial, suivie de l'extraction des matières grasses, puis de la pesée du résidu lipidique obtenu après évaporation du solvant.

Une quantité de 15 g d'échantillon est placée dans une capsule de cellulose. L'extraction est réalisée en continu pendant 6h, à une température de 100 à 110 °C, à l'aide de l'hexane comme solvant. Après l'extraction, les ballons contenant l'extrait lipidique sont soumis à évaporation du solvant à l'aide d'un hydro-distilleur. Une fois refroidis, les ballons sont pesés afin de déterminer la quantité de lipides extraite. La différence de masse permet de calculer la teneur en lipides totaux de l'échantillon.

$$\text{MG (\%)} = [(P2-P1) / P0] \times 100$$

P1 : Poids du ballon à vide.

P2 : Poids du ballon contenant les lipides

P0 : Poids de la prise d'essai.

4.4 Détermination de la teneur en protéines

La teneur en protéines est déterminée selon la méthode de Kjeldahl, qui consiste à mesurer la teneur en azote total dans un échantillon, puis à convertir cette valeur en teneur en protéines à l'aide d'un facteur de conversion spécifique. Pour le blé, ce facteur est généralement de 6,25.

Le principe de cette méthode repose sur la minéralisation de l'échantillon par l'acide sulfurique concentré à chaud, en présence d'un catalyseur, qui transforme l'azote organique en ion ammonium (NH⁺). L'alcalinisation du

digestat par l'ajout d'une solution de soude (NaOH), libérant l'ammoniac (NH₃). La distillation de l'ammoniac libéré, qui est ensuite capté dans une solution d'acide borique, en présence d'un indicateur coloré.

La teneur en protéine a été déterminée en suivant le protocole décrit selon la norme NA.1185/1990, ISO.1871 (NF V03-050).

$$N (\%) = [(0,0014 \times k \times 100 \text{ m}) / (100 - H)] \times 100 \quad TP (\%) = N \times 6,25$$

V: Volume de la solution d'acide, versé à la burette lors du titrage (mm)

m: Masse en gramme de la prise d'essai.

H : Teneur en eau de la prise d'essai.

N : Taux d'azote en pourcentage.

TP : Taux de protéines en pourcentage.

4.5 Détermination de l'acidité titrable (NA : 1182/1990, NF : V03-712, ISO : 7305/1986)

50 grammes de chaque échantillon est broyé puis tamisé. Une partie aliquote de 5 grammes est prélevée est mise dans un bécher contenant 30 ml d'éthanol. On agite pendant une heure à l'aide de l'agitateur mécanique à une température de 20°C ±5°C. Ensuite on centrifuge le mélange pendant 2 min (pour éliminer les particules restant en suspension).

Pour le titrage on prélève 20 ml du liquide surnageant parfaitement limpide puis on ajoute quelques gouttes de phénophtaléine. Le titrage est effectué à l'aide de burette avec la solution d'hydroxyde de sodium 0,05 N jusqu'au virage au rose pâle persistant.

$$[7.35 (V_1 - V_0)T / m] \times [100/100 - H^+]$$

V₁ : Volume en ml de la solution d'hydroxyde de sodium ;

V₀ : Volume en ml de la solution d'hydroxyde de sodium pour l'essai à blanc ;

m : Masse en g de la prise d'essai ;

T : Concentration de la solution d'hydroxyde de sodium utilisée

7,35 : Facteur de correction.

4.6 Détermination du pH

La méthode consiste à mesurer l'activité ionique des ions hydrogène (H⁺) présents dans une suspension aqueuse du blé broyé à l'aide d'un pH-mètre. La mesure est réalisée à température ambiante, après mise en suspension de l'échantillon dans de l'eau distillée, selon un rapport poids/volume défini. Une quantité de 5 g de l'échantillon est broyé puis mélangé avec 50 ml de l'eau distillée. Le mélange est ensuite agité pendant 5 à 7 min puis filtré (NF V 05-108, 1970).

4.7 Détermination du pourcentage des fibres totales ,solubles et insolubles

La teneur en fibres totales dans nos échantillons est déterminée par la méthode de Weende (**Wiederkäuer I, 1860**). Une quantité de 0,5 g d'échantillon est finement broyée dans un bécher puis un volume de 100 ml d'acide sulfurique dilué (0,128 M) est ajouté. Le bécher est placé ensuite dans l'appareil Dosi-Fiber puis l'hydrolyse acide est programmée à 100°C pendant 30 min. Le contenu du bécher est filtré à chaud sur un filtre en verre fritté. Le résidu est rincé abondamment avec de l'eau distillée jusqu'à obtention d'un pH neutre. Ensuite un volume de 100 ml d'hydroxyde de potassium dilué (0,223M) est ajouté dans un Erlenmeyer contenant le résidu. Ce dernier est placé dans l'appareil Dosi-Fiber, puis une deuxième hydrolyse acide est programmée à nouveau à 100°C pendant 30 min. Le contenu est ensuite filtré sur un filtre en verre fritté, puis rincer avec de l'eau distillé jusqu'à neutralité (pH=7). Le résidu est séché dans une étuve (Nuve EN400, Turquie) à 105 °C pendant une heure, puis incinérer dans un four à incinération (Stuart BIBBY.UK) à 500°C pendant 3 heures. Les cendres sont laissées refroidir dans un dessiccateur

puis peser avec une balance analytique (Kern ALS 220-4, Allemagne).

$$\text{Teneur en fibres totales (\%)} = [(P0 - P1) / P0] \times 100$$

P0 : Poids initial de l'échantillon (g).

P1 : Poids des cendres (g).

4.8 Glucides totaux

La teneur en glucides totaux est généralement calculée par différence. Cette méthode consiste à soustraire de 100 la somme des principaux constituants de l'échantillon, à savoir l'humidité, les protéines, les lipides et les cendres. Les glucides représentent ainsi la fraction restante de la matière

La teneur en glucides totaux (%) est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Glucides totaux (\%)} = 100 - (\text{Humidité} + \text{Protéines} + \text{Lipides} + \text{Cendres})$$

4.9 Activité de l'eau

L'activité de l'eau (**A_w**) représente la quantité d'eau libre disponible dans un aliment pour les réactions chimiques, enzymatiques et le développement des micro-organismes. Elle est définie comme le rapport entre la pression de vapeur d'eau de l'échantillon et celle de l'eau pure à la même température.

$$A_w = P/P_0$$

A_w : activité de l'eau ;

P : pression de vapeur d'eau au-dessus de l'échantillon ;

P₀ : pression de vapeur d'eau de l'eau pure à la même température.

Le principe de mesure consiste à placer l'échantillon dans une chambre fermée de l'**A_w-mètre**. L'eau libre contenue dans l'échantillon établit un équilibre avec l'humidité de l'air de la chambre. L'appareil mesure ensuite l'humidité relative à l'équilibre et calcule automatiquement la valeur de l'activité de l'eau.

4.10 la conductivité

La conductivité électrique est un paramètre physico-chimique qui renseigne sur la concentration des espèces ioniques présentes dans un extrait aqueux de blé. Son principe repose sur la mesure de la capacité de la solution à conduire le courant électrique. La détermination est réalisée à l'aide d'un Conductimètre équipé de deux électrodes immergées dans l'extrait. L'appareil applique une faible tension électrique entre les électrodes et mesure la conductance de la solution, qui est ensuite convertie en conductivité. Plus la concentration en ions dissous est élevée, plus la conductivité mesurée est importante. Les résultats sont généralement exprimés en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

5. Analyses Microbiologiques

Le choix de l'analyse microbiologique repose sur l'existence d'une éventuelle contamination de notre produit par des bactéries, des moisissures ou champignons pathogènes et donc une vérification de l'état sanitaire du BFH pendant la réfrigération.

Nous avons utilisé les techniques classiques de microbiologie à savoir, les milieux de cultures et d'enrichissement spécifiques à chaque espèce afin de dénombrer et identifier. Les résultats sont exprimés en unité formant colonie (UFC).

Résultats et discussion

Notre échantillon a été prélevé dans une région rurale de la commune de Mazouna, wilaya de Relizane, au cours du mois de juin 2020, après avoir été stocké de manière traditionnelle dans un grenier souterrain pendant une période de 12 mois suivant la récolte. Après cette phase de stockage, l'échantillon a été conservé au réfrigérateur pendant 5 ans avant la réalisation des analyses.

L'analyse organoleptique a mis en évidence des différences entre le BNF, le BFH et le BFH après réfrigération. Le BNF présente des grains homogènes, une couleur jaune clair et une odeur caractéristique du blé. En revanche, le BFH et le BFH après réfrigération se distinguent par des grains légèrement ramollis, une coloration beige jaunâtre et une odeur acidulée. Ces modifications peuvent être attribuées aux transformations biochimiques induites par la fermentation, notamment l'activité enzymatique et microbienne qui affecte la structure du grain et favorise la production d'acides organiques, en particulier l'acide lactique (**Adebo O.A, 2020**). La similitude des caractéristiques observées entre le BFH et le BFH après réfrigération suggère que le stockage au froid a permis de préserver les propriétés organoleptiques acquises au cours de la fermentation sans altérations significatives (**Marco M.L et al., 2021**).

Tableau 03: Les analyses organoleptique de BNF, BFH et BFH après réfrigération.

Paramètres	BNF	BFH	BFH après réfrigération
Aspect	Grains homogènes	Grains légèrement ramollis	Grains légèrement ramollis
couleur	Jaune clair	Beige jaunâtre	Beige jaunâtre
odeur	Caractéristique du blé	Acidulé	Moins Acidulé

Les résultats des analyses physico-chimiques et biochimiques du BNF, du BFH et du BFH après réfrigération (**tableau 04**) mettent en évidence des différences significatives entre les échantillons, traduisant l'impact de la fermentation et de la réfrigération sur la qualité du produit.

Les résultats obtenus montrent une teneur en humidité de **11,8 %** dans le BNF et de **11,28 %** dans le BFH, indiquant une faible variation après la fermentation. Ces valeurs restent conformes aux intervalles généralement rapportés pour les céréales, où l'humidité du blé est généralement comprise entre **10 et 14 %** selon les conditions de stockage et de transformation (**Khalid A et al., 2023**).

En revanche, le BFH après réfrigération présente des valeurs très contrastées selon les laboratoires (**14,6 % et 7,51 %**), ce qui suggère que cette variation ne peut pas être attribuée uniquement à l'effet de la réfrigération, mais plutôt à des différences méthodologiques, aux conditions d'analyse ou à l'hétérogénéité des échantillons.

La teneur en humidité des céréales est un paramètre essentiel influençant leur stabilité et leur conservation. En effet, une augmentation de l'humidité favorise l'activité microbienne et les réactions enzymatiques, tandis qu'une diminution contribue à améliorer la stabilité du produit au cours du stockage (**Belitz H.D et al., 2009**). Par ailleurs, les processus de fermentation peuvent modifier l'équilibre hydrique du grain en raison de l'activité métabolique des microorganismes et des transformations structurales de la matrice céréalière (**Tamang J.P et al., 2020**).

Le taux de cendres du BNF (**1,7 %**) reste dans les valeurs normales des céréales (**1,5–2,5 %**) selon (**Feillet P, 2000**). Une légère diminution est observée dans le BFH (**1,52 %**), probablement due aux transformations biochimiques liées à la fermentation, qui peuvent entraîner une modification et une redistribution partielle des minéraux dans la matrice céréalière. Après réfrigération, les résultats varient fortement entre les laboratoires (**1,8 % et 3,5 %**), ce qui indique une grande variabilité liée aux conditions expérimentales et ne permet pas de conclure clairement à un effet du

stockage à froid. Globalement, la teneur en cendres reflète le contenu minéral des grains, susceptible d'être influencé par la fermentation et les conditions de conservation (**Belitz H.D et al., 2009 ; Tamang J.P et al., 2020 ; Marco M.L et al., 2021**).

Les résultats montrent une augmentation de la teneur en lipides de **1,9 %** dans le BNF à **2,76 %** dans le BFH. Cette augmentation pourrait être liée aux transformations biochimiques induites par la fermentation, qui favorisent la libération de composés lipidiques initialement liés à la matrice céréalière. Des travaux récents de (**Kaur A et Purewal S.S, 2023**) ont montré que la fermentation des céréales peut modifier la composition nutritionnelle et accroître la disponibilité de certains constituants, notamment les lipides. Après réfrigération, la teneur en lipides diminue à **1,7 %**, ce qui pourrait être attribué à des phénomènes d'oxydation ou de dégradation des matières grasses au cours du stockage.

La teneur en protéines diminue de **11,5 %** dans le BNF à **9,32 %** dans le BFH. Cette diminution peut s'expliquer par l'activité protéolytique des microorganismes fermentaires, qui hydrolysent les protéines en peptides et acides aminés. Selon (**Kitessa D.A, 2024**), la fermentation entraîne des modifications importantes des protéines céréalières en raison de l'action enzymatique des microorganismes. Après réfrigération, les valeurs obtenues (**11,2 % et 9,29 %**) montrent une certaine variabilité qui pourrait être liée aux conditions de conservation et aux différences analytiques entre laboratoires.

Les résultats montrent une augmentation de l'acidité titrable de **0,12 %** dans le BNF à **0,39 %** dans le BFH, puis à **0,85 %** après réfrigération. Parallèlement, le pH diminue de **6,3** à **5,73** puis à **4,1**. Cette évolution traduit une acidification progressive du milieu au cours de la fermentation et du stockage. Des résultats similaires ont été rapportés par (**Moiseenko K.V et al., 2024**), qui ont observé une diminution significative du pH lors de la fermentation de farines de blé sous l'action des bactéries lactiques. De même (**Kitessa D.A, 2024**) a montré que la fermentation des céréales

entraîne généralement une augmentation de l'acidité titrable accompagnée d'une diminution du pH, en raison de la production d'acides organiques tels que l'acide lactique et l'acide acétique par les bactéries fermentaires. Les valeurs obtenues dans notre étude sont également comparables à celles rapportées par (**Atter A et al., 2024**) lors de la fermentation spontanée du mil, où le pH a diminué d'environ **6,0–6,5** à **3,5–4,0** au cours du processus fermentaire. Cette diminution du pH associée à l'augmentation de l'acidité titrable s'explique par la consommation des glucides par les microorganismes et leur conversion en acides organiques, ce qui contribue à améliorer la stabilité microbiologique et la conservation du produit.

Les valeurs obtenues indiquent une augmentation de la teneur en fibres alimentaires, passant de **2,4 %** dans le BNF à **3,45 %** dans le BFH après réfrigération, les valeurs obtenues sont de **2,6 %** et **3,06 %** selon les laboratoires, restant globalement supérieures à celle du BNF. Cette augmentation pourrait être attribuée aux modifications structurales de la matrice céréalière induites par la fermentation, qui favorisent la libération ou la concentration relative de certaines fractions fibreuses. Des études récentes ont montré que la fermentation des céréales peut améliorer la disponibilité des fibres alimentaires grâce à l'action enzymatique des microorganismes sur les parois cellulaires (**Kaur A et Purewal S.S, 2023 ; Kitessa D.A, 2024**). Ainsi, les valeurs obtenues suggèrent que le processus de fermentation a contribué à l'enrichissement relatif du produit en fibres alimentaires, améliorant potentiellement sa qualité nutritionnelle.

Les glucides totaux diminuent de **71,4 %** dans le BNF à **66,9 %** dans le BFH après réfrigération. Cette réduction est probablement due à l'utilisation des glucides comme source d'énergie par les microorganismes au cours de la fermentation. En effet, les sucres fermentescibles sont consommés puis transformés en différents métabolites, notamment des acides organiques. Cette observation est en accord avec les travaux de **Yan X et al., 2025**), qui ont rapporté que la fermentation des céréales provoque une diminution des glucides disponibles en raison de leur métabolisation par la flore microbienne. De même, une étude récente sur les produits céréaliers fermentés a

montré que la consommation des glucides constitue l'un des principaux mécanismes biochimiques associés à la fermentation (**Zhang H, 2024**).

L'analyse de l'activité de l'eau révèle une augmentation de **0,61** dans le BNF à **0,88** dans le BFH après réfrigération. Cette valeur élevée traduit une plus grande disponibilité de l'eau libre dans l'échantillon, ce qui peut favoriser les réactions biochimiques et le développement microbien. Toutefois, en l'absence de la valeur du BFH avant réfrigération, il est difficile d'attribuer cette augmentation uniquement à la fermentation. Selon (**Kitessa D.A ,2024**), les procédés de fermentation et les conditions de conservation peuvent modifier la répartition de l'eau au sein des matrices céréalières et influencer leur stabilité physico-chimique.

Les mesures réalisées indiquent une augmentation de la conductivité de **420 µS/cm** dans le BNF à **690 µS/cm** dans le BFH après réfrigération. Cette augmentation suggère une concentration plus importante en composés ioniques dissous, tels que les sels minéraux, les acides organiques et d'autres métabolites solubles. Cette évolution pourrait résulter des transformations biochimiques survenues au cours de la fermentation et de la conservation. Selon (**Kaur A et Purewal S.S, 2023**), les processus fermentaires favorisent la libération de substances solubles et de composés ioniques, ce qui peut entraîner une augmentation de la conductivité des produits céréaliers fermentés.

Tableau 04: Caractéristiques physico-chimiques comparative de BNF, BFH et BFH après réfrigération.(*) Thèse de doctorat LMD Ameir L (2026).

Paramètres	BNF	BFH(*)	BFH après réfrigération		Méthodes
			Labo Privé	Labo Oravio	
humidité (%)	11.8	11.28	14.6	7.51	Dessiccation à 105 C°
Teneur en cendres (%)	1.7	1.52	1.8	3.5	Incineration 550 C°
Teneur en lipides (%)	1.9	2.76	1.7	/	Soxhlet
Teneur en protéines (%)	11.5	9.32	11.2	9.29	Kjeldahl
Acidité titrable (%)	0.12	0.39	0.85	/	Titrimetrie
pH	6.3	5.73	4.1	/	pH –mètre
Teneur en fibres alimentaires (%)	2.4	3.45	2.6	3.06	Méthode enzymatique
Glucides totaux(%)	71.4	/	66.9	/	Calcul
Activité de l'eau	0.61	/	0.88	/	Aw-mètre
Conductivité (µs/cm)	420	/	690	/	Conductimètre

L'analyse de la flore totale aérobie ne dépasse pas le seuil de la toxicité du BNF et du BFH. Cependant, pendant la réfrigération, nous avons constaté que 03.6×10 UFC/ml ne présenté aucun risque toxicologique pour la consommation humaine selon la norme *ISO4833-1*.

Les résultats de l'analyse des Coliformes totaux est négative selon la norme *ISO4832*. Les Coliformes totaux ont été détectés à des niveaux inférieurs à 10 UFC/ml dans le BNF et le BFH après réfrigération, tandis qu'ils étaient absents dans le BFH. La présence à de faibles concentrations ou leur absence témoigne d'une bonne qualité hygiénique des échantillons et d'une maîtrise satisfaisante des conditions de manipulation et de conservation. L'absence dans le BFH peut être expliquée par l'effet inhibiteur de la fermentation, notamment la production d'acides organiques par les bactéries lactiques, entraînant une diminution du pH et limitant ainsi le développement des bactéries indicatrices de contamination. De manière générale, la réduction des Coliformes dans les produits fermentés est souvent associée à l'acidification du milieu et à l'activité antagoniste des flores lactiques (Petrova P et Petrov K, 2020).

L'absence totale d'*Escherichia coli*, de *Salmonella spp* et de *Bacillus cereus* dans les échantillons BNF, BFH et BFH après réfrigération témoigne d'une bonne qualité microbiologique et d'une innocuité sanitaire satisfaisante du produit. *E. coli* est généralement considéré comme un indicateur de contamination fécale, tandis que *Salmonella spp.* figure parmi les principaux agents responsables des toxi-infections alimentaires. Quant à *Bacillus cereus*, il est fréquemment associé aux céréales et aux produits dérivés en raison de sa capacité à former des spores résistantes aux conditions environnementales.

L'absence de ces microorganismes pathogènes pourrait être attribuée à l'effet combiné de la fermentation et des conditions de conservation. En effet, la fermentation favorise le développement des bactéries lactiques qui produisent des acides organiques, principalement l'acide lactique, ainsi que d'autres composés antimicrobiens capables d'inhiber la croissance de nombreuses bactéries pathogènes (**Petrova P et Petrov K, 2020**).

De plus, l'abaissement du pH et la compétition pour les nutriments contribuent à limiter la survie des microorganismes indésirables (**Marco M.L et al., 2021**). La persistance de cette absence après réfrigération suggère également que les conditions de stockage ont permis de maintenir la stabilité microbiologique du produit. Ces résultats confirment ainsi l'efficacité de la fermentation dans l'amélioration de la sécurité sanitaire des produits céréaliers fermentés et sont en accord avec plusieurs études ayant rapporté une réduction significative, voire une élimination, des bactéries pathogènes au cours de la fermentation lactique (**Kitessa D.A, 2024**).

Les résultats montrent que les *Staphylococcus sp.* étaient présents à des niveaux inférieurs à 10 UFC/g dans les trois échantillons (BNF, BFH et BFH après réfrigération). Ces faibles charges témoignent d'une bonne qualité hygiénique du produit et d'un respect satisfaisant des conditions de préparation, de manipulation et de conservation. Les faibles niveaux observés peuvent également être liés à l'effet inhibiteur de la fermentation, notamment à l'acidification du milieu et à l'activité antimicrobienne des bactéries lactiques,

qui limitent le développement des microorganismes indésirables (**Petrova et Petrov, 2020**). Ces résultats confirment ainsi la bonne qualité microbiologique des échantillons étudiés (**Marco et al., 2021**).

Tableau 05: Évaluation de l'analyse microbiologique.

Paramètres	BNF	BFH	BFH après réfrigération	Normes
Flore totale aérobie (UFC/ml)	2.4×10	$0,20 \times 10$	3.6×10	ISO4833-1
Coliformes totaux (UFC/ml)	<10	Néant	<10	ISO4832
<i>E.coli</i>	Néant	Néant	Néant	ISO16649-2
<i>Salmonella spp</i>	Néant	Néant	Néant	ISO6579-1
<i>Staphylococcus sp</i>	<10	<10	<10	ISO 6888-1
Moisissures (UFC/ml)	10	<10	20 UFC/ml	ISO21527-2
<i>Bacillus cereus</i>	Néant	Néant	Néant	ISO7932
Flore lactique (UFC/ml)	02×10	$2,5 \times 10$	4.8^{10}	ISO 15214
Levures (UFC/ml)	01×10	20×10	7.2×10	ISO 21527

Nos échantillons ne présentent aucun risque de contamination par les moisissures selon la norme ISO21527-2 et particulièrement notre échantillon principal c'est à dire le BFH réfrigéré au froid positif durant les 05 années.

L'évaluation de la flore lactique est une évidence scientifique puisque le BFH est riche en bactéries lactique comme *Lactococcus sp*, *Streptococcus thermophilus*, *Pediococcus acidolactis*, *Weissila confusa* et *Lactobacillus sp* (**Benakriche B et al., 2016**).

La richesse en levures est une évidence non discutable vue que la fermentation du blé en BFH est due principalement à existence des levures comme *S. cerevisié*, *S. bouardii*, *scizosacharomyces pombé*, *S. pastorinus* et *Kluyveromyces lactis* (**Benakriche B, 2026**).

En conclusion, nos résultats montrent que les paramètres physico-chimiques, biochimiques et microbiologiques ne sont altérés profondément par la réfrigération positive. En l'occurrence, le BFH réfrigéré pendant 05 ans de notre étude expérimental semble sauvegarder ses vertu bénéfique pour la santé digestive en terme de métabolites bioactifs.

Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la fermentation a entraîné des modifications importantes de certains paramètres, notamment l'acidité, le pH, les protéines, les fibres et les glucides, traduisant l'activité métabolique des microorganismes fermentaires.

Par ailleurs, le stockage au froid positif n'a pas provoqué d'altérations majeures de la qualité du produit. Les caractéristiques organoleptiques ont été globalement préservées et les analyses microbiologiques ont confirmé l'absence de microorganismes pathogènes tels que *E. coli*, *Salmonella spp.* et *Bacillus cereus*. La présence persistante de la flore lactique et des levures témoigne également du maintien du potentiel fermentaire du produit.

En conclusion, la réfrigération positive apparaît comme une méthode efficace pour la conservation à long terme du blé fermenté Hamoum, permettant de préserver sa qualité nutritionnelle, sa stabilité microbiologique et ses propriétés fonctionnelles.

Ces résultats confirment l'intérêt de la technique de la réfrigération pour la valorisation et la conservation de l'empreinte génétique de cet aliment fonctionnel traditionnel du terroir Algérien. En perspective, l'usage de la réfrigération au froid positif pourrait être recommandée pour une éventuelle utilisation du BFH dans le futur.

Références Bibliographiques

A

Adebo O A (2020). African fermented foods: Overview, emerging benefits, and novel approaches. *Food Research International*: 136.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109493>.

Atter A, Diaz M, Tano-Debrah K, Parry-Hanson Kunadu A, Mayer M J, Sayavedra L, Misita C, Amoa-Awua W and Narbad A (2024). The predominant lactic acid bacteria and yeasts involved in the spontaneous fermentation of millet during the production of the traditional porridge Hausa koko in Ghana. *BMC Microbiology*; 24: 163.

B

Battais F, Richard C and Leduc V (2007). Les allergènes du grain de blé. *Revue française d'allergologie et d'immunologie clinique* ; 47 :171 - 174.

Belitz H D, Grosch W and Schieberle P (2009). *Food chemistry* (4th rev. ed.). Springer

Benakriche B M, Amier L, Kheroua O (2017). **Évaluation** du profil protéique par Electrophorese sur gel SDS-Page d'un blé fermenté naturel type Hamoum compare au blé Normal. Résumé Journées Francophones d'Hépatogastroentérologie and d'Oncologie digestive: 361.

Benakriche B (2026). Le Blé fermenté traditionnel:Quel intérêt en Biotechnologie alimentaire . Congrès international de l'Acfas, Montréal, Canada.

Benakriche B M, Benabdelmoumene D and Mortet A (2016). *Lactic acid bacteria diversity in the fermented wheat Hamoum in West Algeria. Pakistan Journal of Nutrition*; 15(7): 639 - 648.
<https://doi.org/10.3923/pjn.2016.639.648>.

Bonneau L (2003). Information technique sur le blé Boulangerie. < Http : /WWW. Boulangerie. Net/ MP/ Infoblefar.

Boudreau A, and Ménard G (1992). *Le blé : éléments fondamentaux et transformation*. Presses de l'Université Laval.

C

Commane D M, Shortt C T, Silvi S, Cresci A, Hughes R M and Rowland I R (2005). Effects of fermentation products of pro- and probiotics on trans-epithelial electrical resistance in an in vitro model of the colon. *Nutrition and Cancer*; 51(1): 102 - 109.
https://doi.org/10.1207/s15327914nc5101_14.

Cross M L, Stevenson L M and Gill H S (2001). Anti-allergy properties of fermented foods: An important immunoregulatory mechanism of lactic acid bacteria. *International Immunopharmacology*;1(5): 891 - 901.

Cruz J F, Troude T, Griffon D, and Hebert JP (1988). Conservation des grains dans les régions chaudes. 2eme Ed Paris France. Techniques rurales en Afrique. Ministère de la coopération et du développement: 545.

D

Doumandji A, Doumandji-mitiche B and Salaheddine D (2003). Cours de technologie des céréales technologie de transformation des blés et problèmes dus aux insectes au stockage. Office des Publications Universitaires: 1-22.

DRABO M S, KHADEM H, BENATMANE N (2019). Qualité microbiologique du blé dur fermenté de Matmor Hamoum : Indispositions Digestives, microflore avantageusement technologique et potentiels pathogènes. *International Journal of Innovation and Applied Studies*; 27: 11 - 18.

Dunford N T (2012). Food and industrial bioproducts and bioprocessing. WileyBlackwell : 392.

F

Feillet P (2000). Le grain de blé: Composition et Utilisation. In: INRA. Paris, France: 196-198.

Fleurat-Lessard F (2017). *Integrated management of the risks of stored grain spoilage by seedborne fungi and contamination by storage mould mycotoxins – An update. Journal of Stored Products Research*; 71: 22 - 40.
<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.10.002>.

FrigorTec GmbH. (2024). *GRANIFRIGOR™ – Grain cooling units*. FrigorTec. Consulté sur le site officiel de FrigorTec.

G

Golden D and willam G (1991). Spectres vibratoires Raman et infrarouge d'amas de fullerènes C 60 et C 70 séparés par chromatographie. *Lettres de Physique Chimique*;179 :181 - 186.

Gourbeyre, P, Denery, S and Bodinier, M (2011). Probiotics, prebiotics, and synbiotics: Impact on the gut immune system and allergic reactions. *Journal of Leukocyte Biology*; 89(5): 685 - 695.
<https://doi.org/10.1189/jlb.1109753>.

H

Hadria R (2006). Adaptation et spatialisation des modèles stricts pour la gestion d'un périmètre céréalier irriguée en milieu semi-aride. Thèse de doctorat. Univ Cadi Ayad Samlalia- Marrakech.

J

Jennings C and **Vetter C** (2024). *Top fermented foods you can add to your diet*. Healthline.

K

Kaleta A and **Górnicki K** (2013). Criteria of determination of safe grain storage time – A review. In S. Grundas (Ed.), *Advances in Agrophysical Research*: 295 - 318. InTech.

<https://doi.org/10.5772/52235>.

Kaur A et **Purewal S S** (2023). Modulation of cereal biochemistry via solid-state fermentation: A fruitful way for nutritional improvement. *Fermentation*, 9(9), 817. <https://doi.org/10.3390/fermentation9090817>.

Khalid A, **Hameed A**, and **Tahir M F** (2023). *Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality*. *Frontiers in Nutrition*; 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1053196>.

Kitessa, D A (2024). *Review on effect of fermentation on physicochemical properties, anti-nutritional factors and sensory properties of cereal-based fermented foods and beverages*. *Annals of Microbiology*, 74(1), Article 13. <https://doi.org/10.1186/s13213-024-01763-w>

Kocić-Tanackov S D, et **Dimić G R** (2020). *Reduction of sterigmatocystin biosynthesis and growth of food-borne fungi by lactic acid*. *Bioscience of Microbiota, Food and Health*; 39(3): 83 - 88. <https://doi.org/10.12938/bmfh.2019-029>.

L

Levy J (2022). *15 fermented foods for a healthy gut and overall health*. Dr. Axe.

Lortal S, **El Mecherfi K E**, **Mariotti F**, **Eutamène H**, **Rul F**, **Champomier Vergès M C**, and **Savary-Auzeloux I** (2020). *Aliments fermentés and bénéfices santé : un défi pour la recherche*. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 55(3), 136 - 148.

M

Magan N and Lacey J (1988). *Ecological determinants of mould growth in stored grain. International Journal of Food Microbiology*; 7(3): 245 - 256.

ManayShakuntala N and Shadaksharaswamy amy M (2001). *Food : Facts and principles*, Second Edition. New Age International Publishers.

Mannaa M, et Kim K D (2017). *Influence of temperature and water activity on deleterious fungi and mycotoxin production during grain storage. Mycobiology*; 45(4): 240 - 254.

<https://doi.org/10.5941/MYCO.2017.45.4.240>.

Marco M L, Sanders M E, Gänzle M, Arrieta M C, Cotter P D, De Vuyst L, Hill C, Holzapfel W H, Lebeer S, Reid G, and Hutkins R (2021). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on fermented foods. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*; 18(3): 196 - 208.
<https://doi.org/10.1038/s41575-020-00390-5>.

Martin S et Andrantsitohaina R (2002). Mécanismes de la protection cardiaque et vasculaire des polyphénols au niveau de l'endothélium Cellular mechanism of vasculo-protection induced by polyphenols on the endothelium. *Annales de Cardiologie et d'Angéiologie*; 5(6): 303 - 403.

Mensah P (1997) : Fermentation – the key to food safety assurance in Africa ? *Food Control*; 8: 271 - 278.

Moiseenko K V, Glazunova O A and Fedorova T V (2024). Fermentation of rice, oat, and wheat flour by pure cultures of common starter lactic acid bacteria: Growth dynamics, sensory evaluation, and functional properties. *Foods*; 13(15).

Mukisa I M, Byakika S, Byaruhanga YB and Muyanja C (2020). *Application of refrigerated and frozen sorghum malt slurries in the preservation of starter cultures for Obushera from Uganda. Food ScienTech Journal*; 2(2).

<http://dx.doi.org/10.33512/fsj.v2i2.9120>.

N

Navarro S, et Noyes RT (2001). *The mechanics and physics of modern grain aeration management*. CRC Press.

Nout M J R (2009). Rich nutrition from the poorest-cereal fermentations in Africa and Asia. In: Food Microbiology; 26(7): 685 - 692.
[10.1016/j.fm.2009.07.002](https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.07.002).

O

Olmedo A O and cantrell R G (1995). Recurrent selection for grain yield in Durum Wheat. Crop Scid N° 35: 714-719. IN : Evaluation de la qualité d'un germolplasme du blé dur (*Triticum durum Desf*) appréciation de l'aptitude technologique et biochimique.

P

Pasqualone A (2025). *Addressing Shortages with Storage: From Old Grain Pits to New Solutions for Underground Storage Systems*. Agriculture; 15(3): 289.
<https://doi.org/10.3390/agriculture15030289>.

Pekmez H (2016). *Cereal storage techniques: A review*. Journal of Agricultural Science and Technology B; 6(2): 67 - 71.
<https://doi.org/10.17265/2161-6264/2016.02.001>.

Penner R, Fedorak R N, Madsen, K L(2005).« Probiotics and nutraceuticals : nonmedicinal Treatments of gastrointestinal diseases. » Curr Opin Pharmacol; 5: 596 - 603.

Petrova P et Petrov K (2020). *Lactic acid fermentation of cereals and pseudocereals: Ancient nutritional biotechnologies with modern applications*. Nutriments; 12(4), 1118.
<https://doi.org/10.3390/nu12041118>.

Prats J et Grandcount MC (1971). Les céréales 2ème éd Coll. d'enseignement Agricole: 288.

R

Rehman Z U (2006). *Storage effects on nutritional quality of commonly consumed cereals*. Food Chemistry; 95 (1): 53 - 57.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.017>.

Roissart H (1986). Bactéries lactiques. Dans F. M. Luquet (Éd.), *Laits et produits laitiers : Vache, brebis, chèvre*. Lavoisier; 3: 343.

Roudaut H and Lefranc E (2005). Alimentation théorique : Sciences des aliments.

S

Serna-Saldivar S O, et García-Lara S (2016). *Storage of cereals*. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health*: 37 - 45. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00129-X>.

Shewry P R and Hey S J (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*; 4(3): 178 - 202.
<https://doi.org/10.1002/fes3.64>.

Shewry P R (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*; 60 (6): 1537 - 1553.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erp058>.

Shiferaw B, Smale M, Braun H J, Duveiller E, Reynolds M and Muricho G (2013). Crops that feed the world 10: Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Security*; 5(3): 291–317.
<https://doi.org/10.1007/s12571-013-0263-y>.

Sissons M (2008). Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Food*; 2(2): 75–90.

Soltner D (2005). Les grandes productions végétales. 20ème Ed CCTA: 20.

Surget A and Barron C (2005). Histologie du grain de blé, Industrie des céréales ;145: 4 - 7.

T

Tamang J P, Cotter P D, Endo A, Han N S, Kort R, Liu S Q, Mayo B, Westerik N, and Hutkins R (2020). Fermented foods in a global age: East meets West. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*; 19(1): 184 - 217.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12520>.

Tsao R (2010). Chemistry and Biochemistry of Dietary Polyphenols. Guelph Food Research Centre, Agriculture et Agri-Food Canada. Nutriment ; 2 : 1231 - 1246.

V

Vensel W H, Tanaka C K, Cai N, Wong J H, Buchanan B B and Hurkman W J (2005). Developmental changes in the metabolic protein profiles of wheat endosperm. *Proteomics* ; 5: 1594 - 1611.

Vieira B, Barreira J C M, Oliveira, M B (2016). « Commensal and probiotic Bacteria may prevent NEC by maturing intestinal host defenses. » *Trends Food Sci Tech* ;50: 144 - 158.

Vierling E (2008). Aliments et Boissons : Filière et Produits. Doin éditeurs.3ème Édition: 277.

Y

Yan X, Zhang Y, Li M and Wang J (2025). A review of the effects of fermentation on the structure, properties, and application of cereal starch in foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Advance online publication.

Yao A A, Egounlety M, Kouame L P, Thonart P (2009). Les bactéries lactiques dans les Aliments ou Boissons amylacés et fermentés de l'Afrique de l'Ouest : leur utilisation Actuelle. *Ann1.Méd. Vét* ; 153: 54 - 65.

Z

Zhang H, Liu Y and Chen X (2024). Impact of sourdough fermentation on nutrient transformations in cereal-based foods. *Grain & Oil Science and Technology*; 7(2): 85 - 96.

Zhao Y, Lv H and Li Y (2023). Grain storage: Theory, technology and equipment. *Foods*; 12(20): 3792.

<https://doi.org/10.5772/52235>.

Ziegler V, Paraginski R T and Ferreira C D (2021). *Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality – A review. Journal of Stored Products Research*; 91.

<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101770> .