



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم بيولوجية

Département des sciences



## Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialité : Qualité des produits et sécurité alimentaire

## Thème

Etude bibliographique de la fabrication des produits  
alimentaires par fermentation : Cas de *Saccharomyces*  
*cerevisiae* en panification

Présentée par :

ABBAS Ibtissem & BELHADAD Meriem

Soutenu le : 27/06/2022, Devant le jury

	Nom Prénom	Grade	Affiliation/institution
Président :	Mr. GUISSOUS Mokhtar	MCB	(Université de BBA)
Encadrant :	Mme. BOUTANA Wissem	MAB	(Université de BBA)
Examineur :	Mr. MESSAI Chafik Redha	MCA	(Université de BBA)

Année universitaire : 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Résumé

La levure *Saccharomyces cerevisiae* est un modèle de cellule eucaryote impliquée dans des études fondamentales qui sont largement utilisée dans les industries alimentaires et peut être soumise à plusieurs stress pendant les procédés industriels. La présence naturelle de ce micro-organisme *S. cerevisiae*, entraîne spontanément le démarrage de la fermentation des sucres pour produire de l'éthanol et du dioxyde de carbone qui représente la base de nombreux produits liés à l'alimentation ou à la nutrition. Des études sur les voies de fermentation ont montré qu'il s'agissait de processus non seulement chimiques mais aussi biologiques en isolant et cultivant les levures responsables de ces phénomènes. L'activité fermentaire dans un levain étant réduite par rapport à une utilisation directe de levure, il est nécessaire d'optimiser cette activité tout en favorisant au maximum les capacités de rétention gazeuse. En conséquence la fonctionnalité et la viabilité de la levure en sont diminuées. Avant d'être utilisée dans les procédés de panification, de vinification ou de production de bio-éthanol, la levure *Saccharomyces cerevisiae* est d'abord stabilisée et conservée. A travers cette étude, nous avons mentionné que *Saccharomyces cerevisiae* se nourrit de glucose et de fructose. Sa croissance optimale est à 30°C, et à un pH 6,5. Une phase primordiale dans la fabrication du pain dans laquelle la fermentation anaérobie reste l'étape essentielle aux produits de panification, elle a un rôle principal d'enrichir la pâte en dioxyde de carbone. Elle provoque une perte en matière totale entre 2 et 3% par transformation des sucres en alcool et en gaz carbonique accumulé dans le réseau protéique formé principalement de gluten, provoquant la croissance et la fusion des cavités, ce qui se traduit par une augmentation du volume de la pâte panaire.

Le comportement rhéologique de la suspension microbienne dépend de plusieurs paramètres physiques et chimiques à savoir la température, le pH, la concentration de milieu et la vitesse de cisaillement. La maîtrise de ces étapes est alors très importante et nécessaire pour que la qualité des produits fermentés finaux soit élevée.

**Mots clés :** *Saccharomyces cerevisiae*, Panification, fermentation, produits alimentaires

## **Abstract**

The yeast *Saccharomyces cerevisiae* is a eukaryotic cell model involved in fundamental studies that are widely used in the food industries and can be subjected to several stresses during industrial processes. The natural presence of this microorganism *S. cerevisiae*, spontaneously leading to the start of the fermentation of sugars to produce ethanol and carbon dioxide which is the basis of many products related to food or nutrition. Studies on fermentation pathways have shown that these are not only chemical but also biological processes in isolating and cultivating the yeasts responsible for these phenomena. Since the fermenting activity in a leaven is reduced compared to a direct use of yeast, it is necessary to optimize this activity while at the same time promoting the maximum gas retention capacities. As a result, the functionality and viability of the yeast is reduced. Before being used in bread making, wine making or bio-ethanol production processes, the yeast *Saccharomyces cerevisiae* is first stabilized and preserved. In this study, we mentioned that *Saccharomyces cerevisiae* feeds on glucose and fructose. Optimal growth is at 30°C, and pH 6.5. A crucial phase in bread making in which anaerobic fermentation remains the essential stage for bread making products, it has a main role to enrich the dough with carbon dioxide. It causes a total loss of between 2 and 3% by transformation of sugars into alcohol and carbon dioxide accumulated in the protein network formed mainly of gluten, causing the growth and fusion of cavities, these results in an increase in the volume of the planar paste.

The rheological behavior of the microbial suspension depends on several physical and chemical parameters, namely temperature, pH, media concentration and shear speed. Mastering these steps is then very important and necessary for a high quality of the final fermented products.

**Keywords:** *Saccharomyces cerevisiae*, Bread making, fermentation, food products

## المخلص

الخميرة *Saccharomyces cerevisiae* هي نموذج خلية حقيقي النواة تشارك في الدراسات الأساسية التي تستخدم على نطاق واسع في الصناعات الغذائية ويمكن أن تتعرض لعدة ضغوط أثناء العمليات الصناعية. الوجود الطبيعي لهذا الكائن الحي الدقيق *S. cerevisiae*، يؤدي تلقائيًا إلى بدء تخمير السكريات لإنتاج الإيثانول وثاني أكسيد الكربون وهو أساس العديد من المنتجات المتعلقة بالغذاء أو التغذية. أظهرت الدراسات التي أجريت على مسارات التخمير أن هذه ليست فقط عمليات كيميائية ولكنها أيضًا عمليات بيولوجية في عزل وزراعة الخمائر المسؤولة عن هذه الظواهر. نظرًا لأن نشاط التخمير في الخميرة ينخفض مقارنة بالاستخدام المباشر للخميرة، فمن الضروري تحسين هذا النشاط مع تعزيز الحد الأقصى لقدرات الاحتفاظ بالغاز في نفس الوقت. نتيجة لذلك، تتضاءل وظيفة الخميرة وقابليتها للحياة قبل استخدامها في صناعة الخبز أو صنع النبيذ أو عمليات إنتاج الإيثانول الحيوي، يتم تثبيت الخميرة *Saccharomyces cerevisiae* أولاً والحفاظ عليها. في هذه الدراسة، ذكرنا أن *Saccharomyces cerevisiae* يتغذى على الجلوكوز والفركتوز. النمو الأمثل عند 30 درجة مئوية، و6.5 pH. مرحلة حاسمة في صنع الخبز حيث يظل التخمير اللاهوائي هو المرحلة الأساسية لصنع الخبز، وله دور رئيسي في إثراء العجينة بثاني أكسيد الكربون. يتسبب في خسارة إجمالية تتراوح بين 2 و3٪ عن طريق تحويل السكريات إلى كحول وثاني أكسيد الكربون المتراكم في شبكة البروتين التي تتكون بشكل أساسي من الغلوتين، مما يتسبب في نمو واندماج التجايف، وهذا يؤدي إلى زيادة في حجم عجينة الخبز. يعتمد السلوك الريولوجيا للتعليق الميكروبي على العديد من المعايير الفيزيائية والكيميائية، وهي درجة الحرارة والأس الهيدروجيني وتركيز الوسائط وسرعة القص. إتقان هذه الخطوات مهم جدًا وضروري لجودة المنتجات المخمرة النهائية لتكون عالية.

**الكلمات المفتاحية:** *Saccharomyces cerevisiae* صناعة الخبز، التخمير، المنتجات الغذائية.

## *Remerciements*

*En préambule à ce modeste travail nous remercions ALLAH le tout puissant et Miséricor dieux qui nous a aidé et nous a donné de la patience et du courage durant ces longues Années d'étude.*

*En second lieu, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme.Boutana Wissemon la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Egalement, nous remercions les membres de jurys Dr. Guissous Mokhtar et Dr. Messai Chafik Redha d'avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions également nos professeurs et enseignants pour leurs efforts au cours de ces années passées à l'Université de Mohamed El-Bachir EL-Ibrahimi. Sans oublier nos collègues de la promotion 2022.*

*À ceux et celles qui nous ont aidé d'une façon ou d'une autre, de près ou de loin Dans notre travail, nous les remercions du fond du cœur.*

## ***Dédicace :***

*Comment dire merci quand tant de gens ont le droit de remercier...*

*Remercie mon père Ibrahim de m'avoir soutenu physiquement et psychologiquement et de m'avoir fait confiance et tout la famille Belhadad , Benhamadi ,Ayab ,Blawad et Zhagdan .*

*Remercie maman Nora d'avoir sa vie et elle est le plus grand cadeau de Rahman qui m'a appris l'amour et la bonté ?et toute la famille Bennia et Bensfaya et khoudour.*

*Remerciez mes frères Kanza et Fetah et Dounai je leur souhaite bonne chance dans leurs études et votre vie professionnelle, et j'espère vous voir au plus haut niveau Je remercie mes amis Ibtissem,Bouchra,Ismahan,Sabah et Lydia pour leur soutien scientifique et être à mes côtés malgré toutes les incidences .*



*Meriem*

### ***Dédicace :***

*Je dédie ce travail A ma grande famille*

*-A mes très chers parents BACHIR et DJAMILA, surtout ma mère qui m'a poussé, soutenu et encouragé durant toutes les années de mes études, En ce jour mémorable, pour moi et pour vous reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime.*

*-A mes frères pour leur disponibilité, leur soutien, leur encouragement incessant. Ils sont mon bras droit. A mes belles sœurs ; A mes sœurs et leurs conjoints ; A mes neveux et mes nièces.*

#### ***A tous les membres de ma famille***

*-A tous mes proches amis sans exception.*

*-A ma chère binôme Meriem et toute sa famille.*

*-A mon cousin Hako et ma cousine Louiza et mon beau-frère Taher, qu'ils m'ont aidé beaucoup pour réaliser ce travail.*



*Sans oublier principalement mes chères et vraies sœurs: Chaima ; Sabah ; Imane*

*A tous ceux qui occupent une place dans mon cœur*

***Ibtissem***

**Dédicace**

**Remerciements**

**Table des matières**

**Liste des abréviations**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Résumés**

## Table des matières

Introduction.....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur la fermentation en alimentaire</b>	
I.1.Historique : .....	3
I.2. Définition.....	4
I.3. Les types de fermentations .....	4
I.3.1. La fermentation lactique.....	4
I.3.2. La fermentation acétique.....	5
I.4. La fermentation des produits d'origine animale.....	5
I.4.1. La fermentation du fromage .....	5
I.4.2. La fermentation du viande.....	6
I.5. La fermentation des produits végétaux .....	7
I.5.1. La fermentation du chou .....	8
I.5.2. Fermentation du concombre.....	8
I.5.3. Les olives de table.....	9
I.6. Micro-organismes dans les aliments fermentés : .....	10

**Chapitre II :Saccharomyces cerevisiae**

II. 1. Définition.....	14
II. 2. Les caractéristiques de la levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	14
II. 2.1. Taxonomie.....	14
II. 2.2. Morphologie.....	15
II. 2.3. Structure.....	15
II.2.3.1. Composition biologique .....	15
II.2.3.2 Composition biochimique .....	16
II.2.4. Métabolisme .....	17_Toc105872448
II.2.4.2. Métabolisme fermentaire (en anérobiose).....	20
II.2.5. Reproduction.....	21
II.2.5.1. Phases de croissance cellulaire.....	22
II.2.5.2. Cycle de vie.....	23
II.2.6. Origine des différentes souches de la levure : .....	24
II.2.7. Conditions de culture .....	24
II. 3. Influence des paramètres environnementaux sur la levure.....	26
II.3.1. Influence du pH.....	26
II.3.2. Influence de température.....	26
II.3.3. Influence de L'éthanol.....	26
II.3.4. Influence d'oxygène .....	27
II.4. L'application de la levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i> : .....	27
II.4. 1.L'application en vinification .....	27
II.4. 2. L'application enles industries agro-alimentaire .....	27
II.4. 3. L'application dans la fabrication de pain .....	28

### **Chapitre III : L'application de *Saccharomyces cerevisiae* dans la panification**

III.1. Définition .....	29
III.2. Les étapes de panification .....	29
III.2.1. Le pétrissage .....	29

III.2.2. La fermentation .....	320
III.2.2.1.Pointage .....	32
III.2.2.2.Division .....	32
III.2.2.3.Détente .....	33
III.2. 2.4.Le façonnage .....	34
III.2.2.5. L’apprêt.....	35
III.2.3. La cuisson .....	36
III.3. La souche <i>Saccharomyces cerevisiae</i> dans la panification .....	39
III.3.1. Les sources de fermentescibles .....	39
III.3.2. L’effet de la levure au cours de la panification.....	40
<b>Chapitre VI : Résultat et discussion</b>	
<b>VI : Résultat et discussion .....</b>	<b>41</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>47</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>48</b>

## Liste des figures

- Figure 1:** Chronologie de l'apparition des fermentations pour l'alimentation des produits végétaux (en vert) et animaux (en orange). .....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 2 :** la procédé de fabrication du fromage «Bouhezza». **Error! Bookmark not defined.**
- Figure 3 :** Les mécanismes de l'oxydation des lipides et de ses conséquences sur les qualités des aliments. ....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 4:** Morphologie de la levure observée par microscope électronique à balayage. ....15
- Figure 5 :** Représentation schématique d'une cellule de *Saccharomyces cerevisiae* .....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 6 :** Les étapes de glycolyse(A) et de cycle de krebs(B).**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 7:** Les étapes de métabolisme en anaérobiose .....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 8:** Courbe de croissance par lots typique pour la levure**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 9 :**cycle de vie de *Saccharomyces cerevisiae*.....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 10:** Structuration de la pâte au cours du pétrissage .....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 11:** Morphologie de la pâte au cours de panification par microscope électronique .....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 12:** Rôle des hydrolases dans la fermentation.....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 13:** Observation de l'aspect arrondi (prise de force) et du développement (activité de fermentation) des pâtes en fin de pointage. ....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 14:** Division de la pâte en fin de pointage .....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 15:** Différentes phases de façonnage sous forme de pâton allongé**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 16:** Apprêt en bannette.....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 17:** Aspect des pâtons sur couche à la fin du temps d'apprêt.**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 18:** Pains en fin de cuisson dans un four à bois .....**Error! Bookmark not defined.**
- Figure 19:** Étapes du processus de panification .....38
- Figure 20:** Représentation schématique des actions de dégradation et de fermentation des sucre.....**Error! Bookmark not defined.**

## Liste des tableaux

- Tableau 1** :Représentation des produits industriels issus après fermentations .....**Error!**  
**Bookmark not defined.**
- Tableau 2**: Sources et fonctions des éléments nutritionnelles essentiels à la croissance de *Saccharomyces.cerevisiae*.....**E**  
**rror! Bookmark not defined.5**

## Liste des abréviations

**AB** : Amines biogène

**ATP** : Adénosine Tri Phosphate

**ADP** : AdénosineDi Phosphate

**AGAB** : Acide Gamma Aminobutyrique

**AGE** : Acide Gallique Equivalent

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de Carbone

**CO** : Chauffage Ohmique (par résistance électrique)

**DMBQ** : Di-MéthoxyBenz Quinone

**FAD** : Flavine Adénine Dinucléotide

**FA** : Fermentation Alcoolique

**GAP** : GlycérAldéhyde-3-Phosphate

**GTP** : Guanosine Triphosphate

**HAP** : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

**Lb** : Lactobacilles

**MSR** : Méthodologie de Surface de Réponse

**NADH** : Nicotinamide Adénine Dinucléotide

**NAD** : Nicotinamide Adénine Dinucléotide

**PH** : potentiel Hydrogène

**SCN** : Staphylocoques à Coagulase Négative

**S** : Saccharomyces

**SG** : Sans Gluten

**TTP** : Teneur Total en Phénol



# INTRODUCTION



---

---

## Introduction

Le système alimentaire est connu comme étant la manière dont les gens s'organisent pour produire, distribuer et consommer de la nourriture, tel que défini par Louis Malassis. Il y a dix mille ans, il a franchi une étape radicale dans la production agricole dans diverses parties du monde, en particulier entre les fleuves Tigre et Euphrate (Ration, 2008).

La fermentation est un processus dans lequel de grosses molécules organiques sont décomposées en molécules plus simples par l'action de micro-organismes. (Sharma *et al.*, 2020), en premier lieu, les aliments fermentés ont été obtenus par fermentation spontanée, suivie d'une fermentation incontrôlée, entraînant le développement de diverses compétences pour contrôler les paramètres techniques pendant les processus de fermentation. En outre, l'expérience a montré que l'inoculation de la matière première avec une petite quantité d'un lot déjà fermenté avec succès. En ce moment, dans certains secteurs de l'industrie manufacturière, la fermentation est contrôlée par l'inoculation de cultures de départ sélectionnées (Corsetti *et al.*, 2012).

A mesure que la population mondiale et la demande alimentaire qui ont augmenté, ce qui a entraîné l'utilisation de la fermentation à une échelle beaucoup plus grande pour répondre aux nouveaux besoins nutritionnels (Rajet *et al.*, 2021), la consommation d'aliments fermentés contenant des micro-organismes vivants est apparue comme une stratégie alimentaire importante pour améliorer la santé humaine (Rezac *et al.*, 2018)

Les aliments et les boissons fermentés, comme le fromage, les olives de table, le vin, la bière et le pain sont préparés et consommés depuis des milliers d'années et sont profondément enracinés dans la culture et à la tradition, en particulier dans les foyers ruraux et les communautés villageoises. Les raisons fondamentales du développement et de l'acceptation des aliments fermentés (Hammes, 1990).

En ces jours, la fermentation est utilisée dans de nombreux procédés industriels et est présente dans l'alimentation du monde entier. En raison de ses multiples utilisations et de sa méthode largement répandue, ce présent travail synthétise la fermentation et leur type dans le premier chapitre, puis dans le deuxième chapitre la levure *Saccharomyces cerevisiae* et leurs caractéristiques et en fin dans Le troisième chapitre l'application de *Saccharomyces cerevisiae* dans la panification.

Nous avons traité dans la partie résultats et discussions trois approches récentes dans l'utilisation de la levure de boulanger, la première consiste à l'utilisation d'une farine

sans gluten durant la cuisson par chauffage par résistance électrique, la deuxième étude concerne l'utilisation de bactéries lactiques durant la fermentation, une troisième approche qui se focalise sur l'amélioration de d'autres souches de levures autres que *Saccharomyces cerevisiae*. Nous terminerons en fin par une conclusion générale.



# CHAPITRE I

## Généralité sur la fermentation en alimentaire

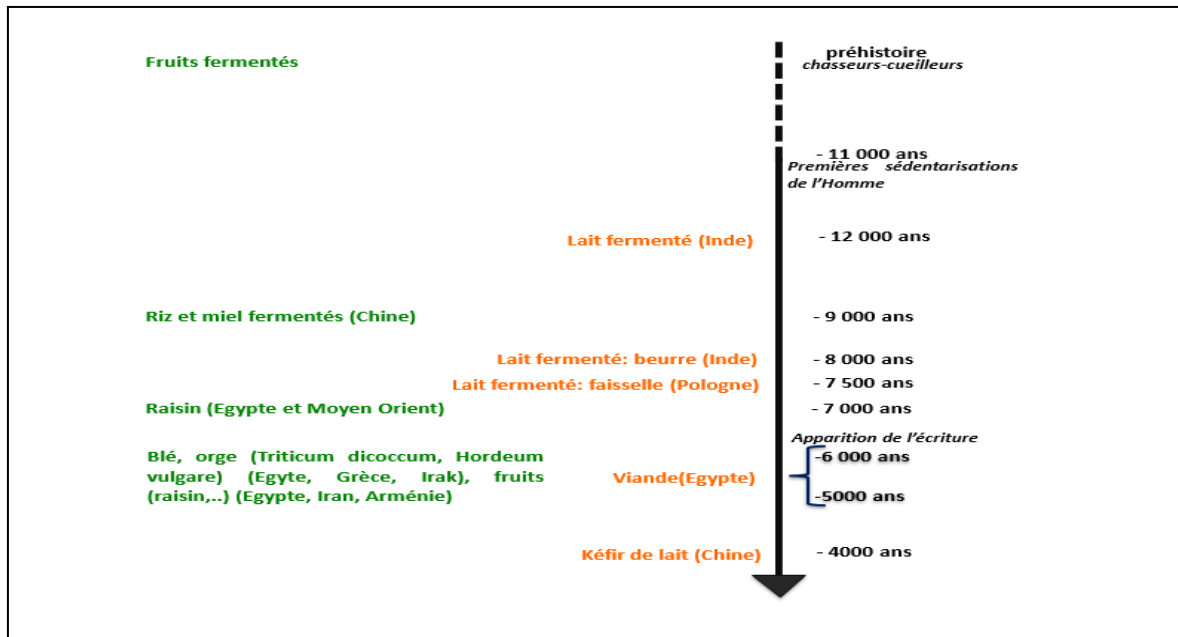
### I.1.Historique

À partir d'environ 5 000 an avant J.-C., les Sumériens et les Égyptiens ont produit des variétés d'aliments fermentés, comme le pain, le vin et la bière. Ils n'avaient pas les connaissances nécessaires pour expliquer précisément comment ces produits ont été fabriqués, ainsi que pourquoi la fermentation se produisait, la fermentation a été très active dans le domaine de la conservation d'aliments. Les humains ont profité du processus de fermentation naturelle pour développer de nombreux produits, y compris les médicaments, les carburants et les aliments (Rejet *et al.*, 2021). (La chronologie de l'apparition des fermentations pour l'alimentation des produits végétaux et animaux est rédigée dans le schéma ci-dessus).

En 1665, Anthony van Leeuwenhoek et Robert Hooke ont souligné que les Micro-organismes sont présents pendant la fermentation (Gest, 2004).

En 1854, Louis Pasteur a prouvé la relation entre la levure et la relation entre les cellules vivantes et la fermentation (Li et K, 2004), il est le premier qui a défini le métabolisme fermentatif anaérobie, connu comme « la vie sans l'air ». (Müller, 2001 ; Li et K, 2004).

À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le chimiste allemand Eduard Buchner publie son premier article de recherche sur les extraits de levure (1897) (Hussenet, 2017)



**Figure 01 :** Chronologie de l'apparition des fermentations pour l'alimentation des produits végétaux (en vert) et animaux (en orange). (Yang *et al.*, 2014).

## I.2. Définition

La fermentation, selon le dictionnaire Gaffiot (1934) vient du latin *fervōr*, *-oris* qui signifie bouillonnement, effervescence, selon la définition du dictionnaire Larousse en ligne en latin *fermentatio*, *-onis*. La fermentation est un processus idéal pour la modification biochimique des principaux substrats alimentaires par les micro-organismes et leurs enzymes ((Urien, 2015 ; Nkhata *et al.*, 2018) et favorise l'apparition d'aliments plus nutritifs que les non fermentés (Hasan *et al.*, 2014).

## I.3. Les type de fermentations

La fermentation englobe plusieurs type selon le substrat consommé en début ou selon le produit qui apparait à la fin du processus on distingue : la fermentation lactique, acétique, alcoolique.etc. (Valence-Bertel *et al.* 2019)

### I.3.1. La fermentation lactique

Qui impliquent des microorganismes différents souches : *Lactococcus lactis*, *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus delbrueckii*, *Propionibacterium freudenreichii*... et la réaction suivante montre la transformation de saccharose en acide lactique : Saccharose, Fructose,

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

### I.3.2. La fermentation acétique

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

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

### I.3.3. La fermentation alcoolique

Elle implique des microorganismes différents: *Oenococcus oenos*, *Saccharomyces cerevisiae...* ; dont lequel cette dernier transforme le saccharose et le maltose en éthanol et CO<sub>2</sub>

Saccharose => Glucose => pyruvate => Ethanol + CO<sub>2</sub>

Maltose => Glucose => Pyruvate => Ethanol + CO<sub>2</sub> (malolactique microorganismes).

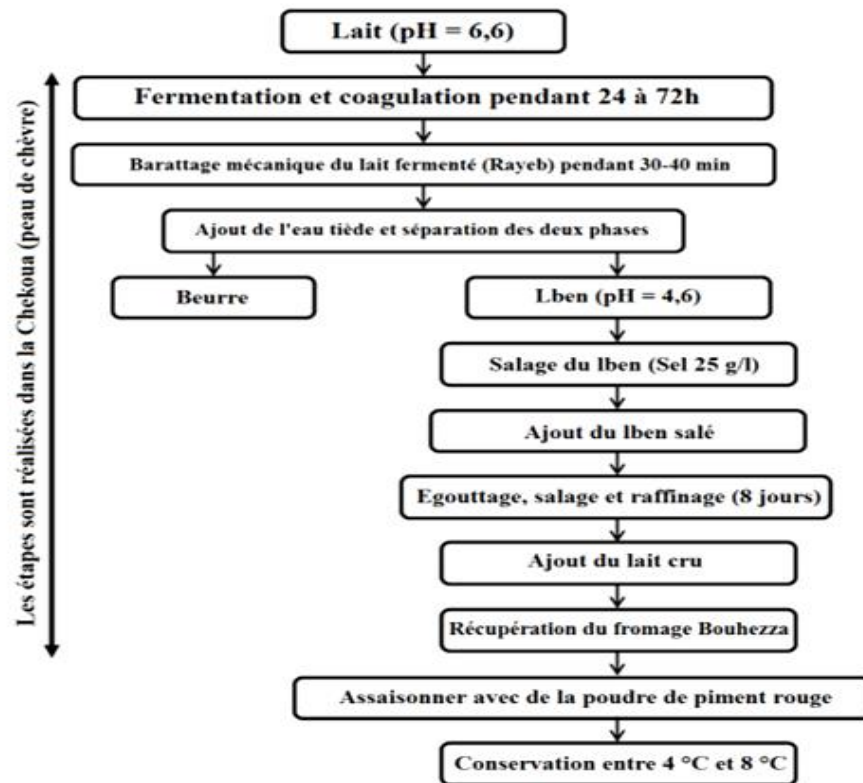
### I.4. La fermentation des produits d'origine animale

Les produits d'origine animale peuvent être fermentés : à base de viande ou du lait (Urien, 2015).

#### I.4.1. La fermentation du fromage

À mesure que la qualité de vie s'améliore, les besoins alimentaires des gens ont changé à la fois en quantité et en qualité (Zheng, 2021)

Les fromages traditionnels sont fabriqués en coagulant le lait de consommation en une masse semi-solide, à l'aide d'un agent de coagulation comme l'acide lactique, la présure, la chaleur, ou une combinaison de ceux-ci. Généralement, il est préparé en ajoutant une quantité appropriée de bactéries lactiques starter avec présure au lait (Zheng *et al.* 2021). Les caractéristiques peuvent varier considérablement, y compris l'odeur, la couleur, la saveur, la texture, et la stabilité, qui sont généralement attribuées à la technologie de production, la teneur en humidité, la source de lait, l'existence de moisissures spécifiques, Levure et les bactéries ... (Mucchetti *et al.*, 2008 ; Santiago-López *et al.*, 2018). Certains des processus les plus importants dans la production de fromage naturel sont mondiaux (Zheng *et al.*, 2021). Schéma illustratif du procédé de fabrication du fromage «Bouhezza» représenté dans la **Figure 02**.



**Figure 02** : Le procédé de fabrication du fromage «Bouhezza» (Boudalia et *al.*, 2020)

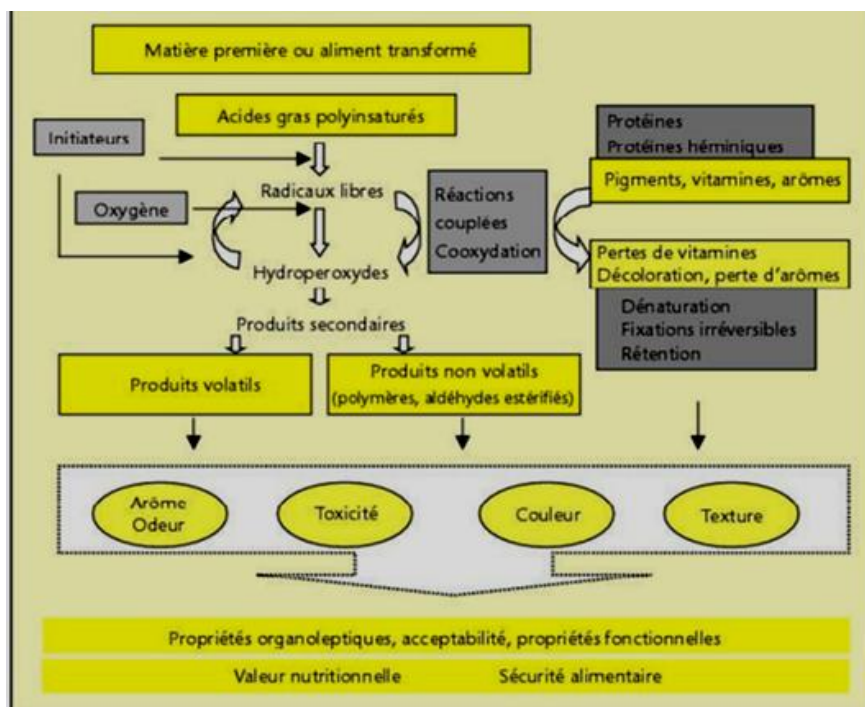
#### I.4.2. La fermentation de viande

Les starters sont des cultures microbiennes utilisées pour promouvoir et conduire la fermentation des produits carnés, peuvent aider à normaliser les propriétés du produit et raccourcir les temps de maturation. Les bactéries, en particulier les bactéries lactiques (BL) et les staphylocoques à coagulase négative (SCN), ainsi que les levures et les moisissures, peuvent être utilisées comme facteurs de départ. Ils peuvent améliorer la sécurité des produits carnés fermentés par une acidification rapide du substrat ou par la production de substances antimicrobiennes telles que les bactériocines (Laranjo *et al.*, 2019).

Les amines biogènes (AB) sont des composés azotés potentiellement dangereux formés par décarboxylation de certains acides aminés, causés par certains micro-organismes peuvent être responsables de leur formation. Les starters peuvent provoquer une baisse rapide du pH, inhibant le développement de micro-organismes avec une capacité de décarboxylation d'acide aminé, empêchant ainsi l'accumulation de AB dans les produits de viande fermentés, en outre, pendant la maturation et le stockage, les starters peuvent entrer en compétition avec le microbiote non artificiel, réduisant la production de

AB. Il a été démontré que certaines souches de *Lactobacillus sakei* et de *Lactobacillus plantarum* réduisent la formation ou alors l'accumulation d'AB, d'autre part, les souches *Staphylococcus xylosus* et *Debaryomyces hansenii* dégradent l'AB dans les aliments. Les starters mixtes contenant *Lactobacillus spp.*, les *Cocci* et les levures Gram positive ont été utilisés dans la fabrication de saucisses de viande. Cependant, l'effet des starters sur l'accumulation des HAP qui sont des composés organiques qui contiennent de multiples cycles aromatiques et produits par la combustion incomplète de matières organiques, comme le bois utilisé pour fumer de la viande reste mal compris (Laranjo *et al.*, 2019).

La salubrité microbiologique et chimique de produits et l'innocuité de la viande fermentée peuvent être compromis par des facteurs microbiologiques, notamment les germes pathogènes d'origine alimentaire (*Salmonella spp.*, *Listeria spp.* etc.) et les dangers chimiques, en particulier les amines biogènes, les nitrosamines, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les mycotoxines (Laranjo *et al.*, 2019). (Voir la figure ci-dessous)



**Figure 03.** Les mécanismes de l'oxydation des lipides et de ses conséquences sur les qualités des aliments (Genot *et al.*, 2004)



## I.5. La fermentation des produits végétaux

La fermentation des produits végétaux est pratiquée par l'homme depuis des milliers d'années. Elle est développée dans le monde entier, impliquant des fruits et des graines (Urien, 2015). Les données d'espèces dans les fermentations végétales sont très variables selon le type d'aliment étudié (Valence-Bertel *et al.*, 2019).

### I.5.1. La fermentation du chou

L'utilisation du chou frais avec lactobacille, est principalement utilisée pour fabriquer le chou fermenté, qui est appelé la choucroute (2,25 à 2,5% de sel est ajouté pour limiter les activités des bactéries indésirables Gram-négatif). La fermentation commence avec *Leuconostoc mensesterioide* qui transforme le sucre en acide lactique, acide acétique, alcool, dioxyde de carbone et d'autres produits qui contribuent à la saveur de la choucroute (le CO<sub>2</sub> agit pour maintenir les conditions anaérobies nécessaires à la fermentation du chou), après *Leuconostoc mensesteroids* est inhibé, la fermentation se poursuit avec *Lactobacillus brevis*, *Pediococcus cerevisiae*, enfin, *Lactobacillus plantarum*. *Lb. Plantarum* et *Lb. brevis* agissent sur les stades finaux de la production de choucroute (*Pediococcus cerevisiae* et *Enterococcus faecalis* peuvent également contribuer à développement de produits) (Jay, 1996).

En cas de non disponibilité des légumes frais, et pour maintenir une texture végétale fraîche et fragile pour la consommation hivernale, la méthode traditionnelle coréenne de fabrication de légumes kimchi est utilisée : L'ail, poivron rouge, oignon vert et gingembre sont hachés et mélangés avec des radis râpés et farcis entre les feuilles de chou salées. Pour garder les ingrédients immergés dans le jus, le kimchi est enveloppé dans un pot de terre, enterré dans le sol, et pressé avec une pierre placée à l'intérieur. *Leuconostoc mensesteroides* est le microorganisme dominant avant la maturation, mais *Lactobacillus spp* est l'organisme dominant dans le kimchi fermenté (La dominance des espèces de *Lactobacillus* varie selon la température) (Lee, 1997).

La différence entre la choucroute et le kimchi réside au niveau du point final de fermentation, le kimchi le plus savoureux est obtenu avec *Lactobacillus*, la production de choucroute dépend de *Lb. brevis* et *Lb. Plantarum* (prolifèrent à un pH optimal de 4,5. La prolifération de *Lb. Brevis* et *Lb. plantarum* diminue conditionnellement la qualité du produit) (Li, 2004).

### I.5.2. Fermentation du concombre

Les concombres sélectionnés sont présents dans la saumure à environ 5 % de NaCl dans la composition naturelle des cornichons. Pendant la fermentation, la force de la saumure est

augmenté progressivement jusqu'à atteindre environ 16% de NaCl et Selon les conditions de fermentation, (environ 0,6 à 1,2% de l'acide lactique est composé en 7 à 14 jours). Les espèces impliquées sont : *Leuco nostocmensenteroides*, *Pediococcus cerevisiae*, *Lactobacillus revis* et *Lactobacillus. Blantarum*. Lorsque la fermentation est terminée et que le pH est réduit à 3,2, le métabolisme de *Lactobacillus. Plantarum* est inhibé. Après le concombre fermenté doit être dessalé avant d'être utilisé dans les produits. Cependant, le niveau de NaCl dans la solution d'un dessalement crée un problème de dumping. Mais pour la saumure des concombres dans des réservoirs anaérobies fermés à des concentrations de sel largement plus faibles des mesures ont été élaborées (Flemming *et al.*, 1988).

Dans la fermentation naturelle, des ballonnements dans les cornichons défectueux se produisent souvent. Les ballonnements sont dus à l'accumulation de gaz CO<sub>2</sub> à l'intérieur du concombre pendant la fermentation. La respiration de tissus de concombre et la fermentation par *Pediococcus. Cerevisiae* et *Lb. plantarum* produisent suffisamment de CO<sub>2</sub> pour causer des ballonnements (Etchells *et al.* 1975).

Des recherches ont montré que l'utilisation d'une culture *Lactobacillus Plantarum* dans la fermentation du concombre mariné peut réduire le niveau de dioxyde de carbone libéré dans la fermentation du concombre, et les levures sont traditionnellement considérées comme indésirables car elles produisent du CO<sub>2</sub>. Le N<sub>2</sub> est utilisé pour désinfecter les cuves de fermentation du concombre afin d'éviter les ballonnements, l'utilisation de levure (*Saccharomyces cerevisiae* ou *S. rosei*) en culture mixte peut faciliter le métabolisme complet du sucre (Daescnel *et al.* 1988). Le problème d'adoucissement dans les cornichons est attribué à des enzymes de décomposition qui dégradent le tissu du concombre, leur source peut être des micro-organismes au-dessus de concombre (Prescott et Dune ,1982).

Pour réduire les défauts de fermentation, un processus de fermentation contrôlée est utilisé. La méthode utilise de l'eau chlorée pendant 25 jours et comprend un salinomètre, acidification de l'acide acétique, un ajout d'acétate de sodium et pollinisation en utilisant *Pediococcus. Cerevisiae* et *Lactobacillus. Blantarum* ( Prescott et Dune ,1982).

### **I.5.3. Les olives de table**

La norme commerciale du Conseil international de l'huile d'olive pour les olives de table (COI, 2004), le désigne comme étant les fruits sains d'oliviers cultivés .sélectionnés pour la production d'olives de table. La forme des olives, la taille, le caractère, le goût et la facilité de séparation les rendent particulièrement adaptés à la transformation.

Ils sont traités pour enlever leur amertume et conservés par fermentation naturelle ; ou par traitement thermique, avec ou sans ajout de conservateurs ; emballés avec ou sans liquide de

couverture (Corsetti *et al.*, 2012).

Les olives de table sont fabriquées à partir des légumes salés, et tous les produits qui sont garantis pour être préparés et conservés grâce à une combinaison de techniques de salage, de fermentation et/ou d'acidification, en général, la fermentation est réalisée par des lactobactéries hétérogènes (Lb) et/ou des levures et elle est dépendante de la variété ainsi que des pratiques industrielles et agricoles. Le traitement initial et les changements subséquents mènent à une séquence microbienne menant à la dominance de ces micro-organismes et aux caractéristiques souhaitées du produit (Corsetti *et al.*, 2012). Tout écart par rapport aux conditions environnementales requises peut modifier l'acidité lactique et la concentration en sel de 4 à 8 % (p/v) selon différents facteurs, comme le pH final, l'ajout d'acide organique et la température d'entreposage (Montano *et al.*, 2003).

Les principaux objectifs de la transformation sont d'éliminer l'amertume causée par la décomposition de certains composés phénoliques comme l'*oleuropéine* (Ciafardini *et al.*, 1994), d'obtenir un effet de conservation et d'améliorer les Caractéristiques organoleptique de la structure du produit final(Corsetti *et al.*, 2012).

### **I.6. Micro-organismes dans les aliments fermentés**

Selon le catalogue des microorganismes d'intérêt en fermentation alimentaire conçu en 2012, un nombre de 195 bactéries et 69 espèces de levures ont été identifiées comme métaboliquement actif dans les produits de fermentation (Bourdichon *et al.*, 2012). (Les produits industriels issus des fermentations sont indiqués dans le tableau 1)

*Les Bacillus amyloliquefaciens, Bacillus circulans, Bacillus coagulans, Bacillus firmus, Bacillus licheniformis, Bacillus megaterium, Bacillus pumilus, Bacillus subtilis, Bacillus subtilis variété natto, et Bacillus thuringiensis* font partie des bactéries présentes dans les légumineuse fermentées (Kierset *al.*, 2000; Kuboetet *al.*, 2011), pendant ce temps, au Nigeria, des isolats de *bacillus creuse* ont été isolés à partir de la fermentation de grains de prosopis africains pour la production d'okpehe(Oguntoyinboet *al.*, 2007). *Le bacille* peut être trouvé dans les aliments alcalins fermentés asiatiques et africains (Parkoudaetal., 2009 ; Tamang, 2015).

L'association de plusieurs espèces de *Kocuria*, de *Micrococcus* (un genre d'Actinobacteries) et de *Staphylococcus* a été signalée pour les produits laitiers fermentés, les saucisses fermentées, la viande et les produits dérivés (Martin et coll, 2006 ; Coton et coll, 2010). Les espèces de *Bifidobactérie*, de *Brachybacterium*, de *Brevibacterium*, et de *Propionibacterium* sont isolées à partir de fromage, et les espèces d'Arthrobacter et de Hafnia à partir de produits de viande fermentés (Bourdichon et coll, 2012).

Les *Enterobacter cloacae*, *Klebsiella pneumoniae*, *K. pneumoniae* subsp. *Ozène*, *haloanaerobium*, etc. sont également présents dans de nombreux aliments fermentés à l'échelle mondiale (Tamang, 2010).

Le rôle principal des moisissures dans les aliments fermentés et les boissons alcoolisées est la production d'enzymes et la dégradation des facteurs anti-nutritifs (Aidoo et Nout, 2010). Des espèces *d'Actinomucor*, *d'Amylomyces*, *d'Aspergillus*, *de Monascus*, *de Mucor*, *de Neurospora*, *de Parcilomyces*, *de Penicillium*, *de Rhizopus* et *d'Ustilago* ont été identifiées pour de nombreux aliments fermentés, des entrées amylolytiques non alimentaires asiatiques et des boissons alcoolisées (Nout et Aidoo, 2002 ; Chen et coll, 2014).

Les bactéries lactiques sont largement présentes dans de nombreux aliments et boissons fermentés (Stiles et Holzapfel, 1997 ; Tamang, 2010).

Les levures les plus courantes trouvées dans les aliments fermentés, les boissons alcoolisées et les starters amylolytiques mélangés non alimentaires sont principalement des *brettanomyces*, *Candida*, *Cryptococcus*, *Debaryomyces*, *Dekkera*, *Galactomyces*, *Geotrichum*, *Hansenula*, *Hanseniaspora*, *Hyphopichia*, *Issatchenkia*, *Kazachstania*, *Kluyveromyces*, *Metschnikowia*, *Pichia*, *Rhodotorula*, *Rhodospiridium*, *Sporobolomyces*, *Torulasporea*, *Torulopsis*, *Trichosporon*, *Yarrowia*, *Zygosaccharomyces*, *Saccharomyces*, *Saccharomycodes*, *Saccharomycopsis* et *Schizosaccharomyces*, (Watanabe *et al.*, 2008; Tamang et Fleet, 2009; Lv *et al.*, 2013).

**Tableaux 01** : Représentation des produits industriels issus après fermentations (Müller, 2001) :

<b>Produits</b>	<b>Matières premières</b>	<b>Micro-organismes impliqués</b>
Aliments :		
Bière	Grains	<i>Saccharomyces spp</i>
Vin	Fruits, raisins	<i>Saccharomyces spp</i>
Pain		
Levain	Farine de blé	<i>Lactobacillus spp.</i>
Blanc		<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Saucisse	Porcs et de bœufs	<i>Pediococcus cerevisiae</i>
Cornichons	Concombre	<i>Lactobacillus spp.</i>
Yaourt	Lait	<i>Lactobacillus delbrueckii</i> ssp. <i>Bulgaricus</i>
Brie		<i>Brevibacterium linens, Penicillium cam</i>
Cheddar		<i>bertii, Lactobacillus casei,</i> <i>Streptococcus cremoris</i> <i>Lactobacillus casei, Streptococcus</i> <i>cremoris</i>
Chemicals :		
Éthanol	Sucreries, lactosérum, liqueurs sulfites, amidons Glucose, maltose, saccharose, lactosérum	<i>Saccharomyces spp</i> <i>Lactobacillus delbrueckii</i> ssp. <i>delbrueckii,</i> <i>Lactobacillus delbrueckii</i> ssp. <i>lactis,</i>
Lactate	Amidons, mélasses	<i>Lactobacillus delbrueckii</i> ssp. <i>Bulgaricus</i>
Acétone-butanol		<i>Clostridium spp.</i>

A decorative graphic consisting of a vertical line on the left and a horizontal line below the chapter title, intersecting to form a crosshair.

## CHAPITRE II

*Saccharomyces cerevisiae*

### **Introduction sur *saccharomyces cerevisiae***

Les levures présentes dans la flore céréalière appartiennent à divers genres : *Pichia*, *Candida*, *Saccharomyces*. Cette dernière est la plus courante, notamment l'espèce *S. cerevisiae* (80%), *Saccharomyces exiguus*, *S. minor*, *S. uvarum*, *S. ellipsoidus* et *S. turbidans* (Kurtzman et al. 1998). *Saccharomyces cerevisiae* est utilisé comme organisme clé depuis de nombreuses années pour identifier et comprendre les mécanismes moléculaires derrière la fonction de toutes les cellules eucaryotes (Knop et al., 2011).

#### **II. 1. Définition**

*Saccharomyces cerevisiae* est un organisme eucaryote unicellulaire capable de se diviser rapidement dans un milieu défini. Chaque cellule est répliquée par bourgeon, qui est grossit au cours du cycle cellulaire, fournissant un indicateur morphologique de la progression du cycle (Kreger-Van Rij, 1969 ; Mitchison, 1971). *S. cerevisiae* est la levure la plus cultivée, plusieurs recherches et développement se concentrent sur ce micro-organisme car il possède les caractéristiques cellulaires des organismes supérieurs, des besoins nutritionnels simples et des taux de reproduction avantageux, bien qu'il ne se reproduise pas aussi vite que les bactéries. D'un point de vue économique, son aptitude à la production industrielle et son large éventail d'applications le rendent unique (Harrison et Rose, 1970 ; Poitrenaud, 2003 ; Sicard et Legras, 2011).

#### **II. 2. Les caractéristiques de la levure *Saccharomyces cerevisiae***

Parmi les levures, *Saccharomyces cerevisiae* est le premier eucaryote dont le génome a été entièrement séquencé (en 1996). En raison de son développement rapide, de ses populations importantes et de ses faibles coûts de propagation, elle semble être l'un des modèles les plus couramment utilisés en génétique (Botstein et Fink, 2011 ; Silar et Malagnac, 2013). Les souches de *Saccharomyces cerevisiae* se distinguent par un certain nombre de caractéristiques fondamentales (Castan, 2016).

##### **II. 2.1. Taxonomie**

D'après E.C. Hansen, 1883. La taxonomie de *Saccharomyces cerevisiae* est classée comme suit :

**Règne** : Fungi

**Division** : *Ascomycota*

**Sous-division** : *Saccharomycotina*

**Classe** : *Saccharomycetes*

**Ordre** : *Saccharomycetales*

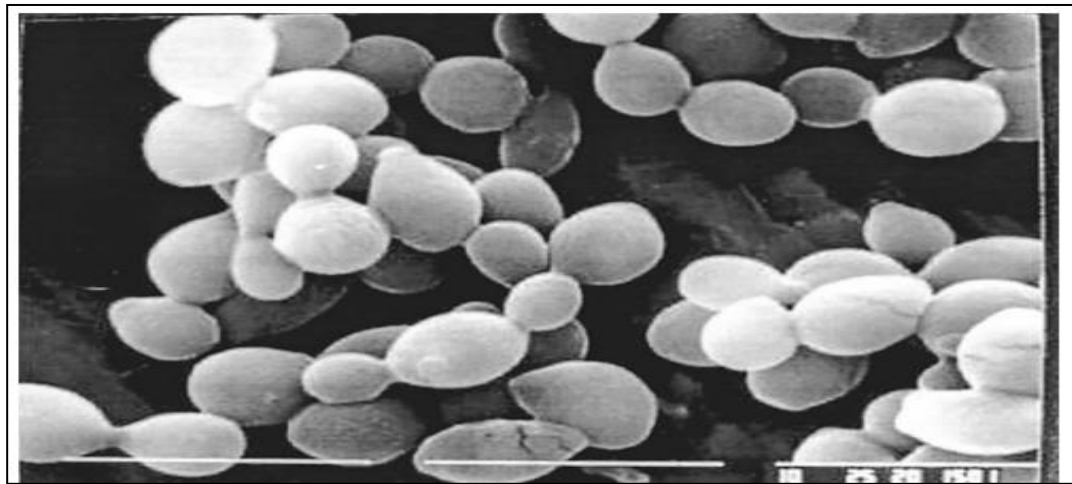
**Famille** : *Saccharomycetaceae*

**Genre :** *Sacharomyces*

**Espèce :** *Saccharomyces cerevisiae*

## II. 2.2. Morphologie

Les cellules de levure varient de forme ovale à ronde, avec une longueur de 5 à 10  $\mu\text{m}$  et une largeur de 5 à 7  $\mu\text{m}$ . Mais certaines sont plus grandes de 2,5 à 21  $\mu\text{m}$  (**Figure04**). Les levures ont environ la taille d'un globule rouge et sont beaucoup plus grandes qu'une cellule bactérienne. La taille moyenne des cellules varie en fonction du stade du cycle de croissance, les conditions de croissance et de l'âge de la cellule (les cellules anciennes deviennent de plus en plus grandes) (Russell, 2003).



**Figure 04 :** Morphologie de la levure observée par microscope électronique à balayage (Poitrenaud, 2003).

## II. 2.3. Structure

La présence d'organismes caractérise la structure organisée de la cellule eucaryote. Les cellules de levure ont toutes les caractéristiques des eucaryotes mais se distinguent des cellules végétales ou animales par leur petite taille. En effet, la levure est la plus petite des celluleseucaryotes(Thuriaux ,2004).

### II.2.3.1. Composition biologique

La structure biologique de la levure est représentée par le microscope électronique à transmission dans la **Figure05** :

**-La paroi cellulaire :** est épaisse et rigide. Elle est composée de trois couches de composition différentes : la couche externe, constituée de mannanes phosphorylés et de glycoprotéines ; la couche médiane, constituée de bêta-glucanes solubles ; la couche interne, qui contient des bêta-glucanesin solubles ((L'arpent et L'arpent-Gourgaud, 1997 ; Maggiar ,2014).



-**La membrane cytoplasmique** : est constituée de glycolipides et de glycoprotéines. Elle régule les interactions entre les milieux intracellulaires et extracellulaires. Elle se distingue par une perméabilité sélective qui permet à l'eau et aux solutions spécifiques de circuler tout en préservant les grosses molécules (Poitrenaud, 2003).

-**Le Cytoplasme** : Le cytoplasme occupe la majorité de l'espace de la cellule. Il contient tous les organismes (Guinet et Godon, 1994 ; Thuriaux, 2004).

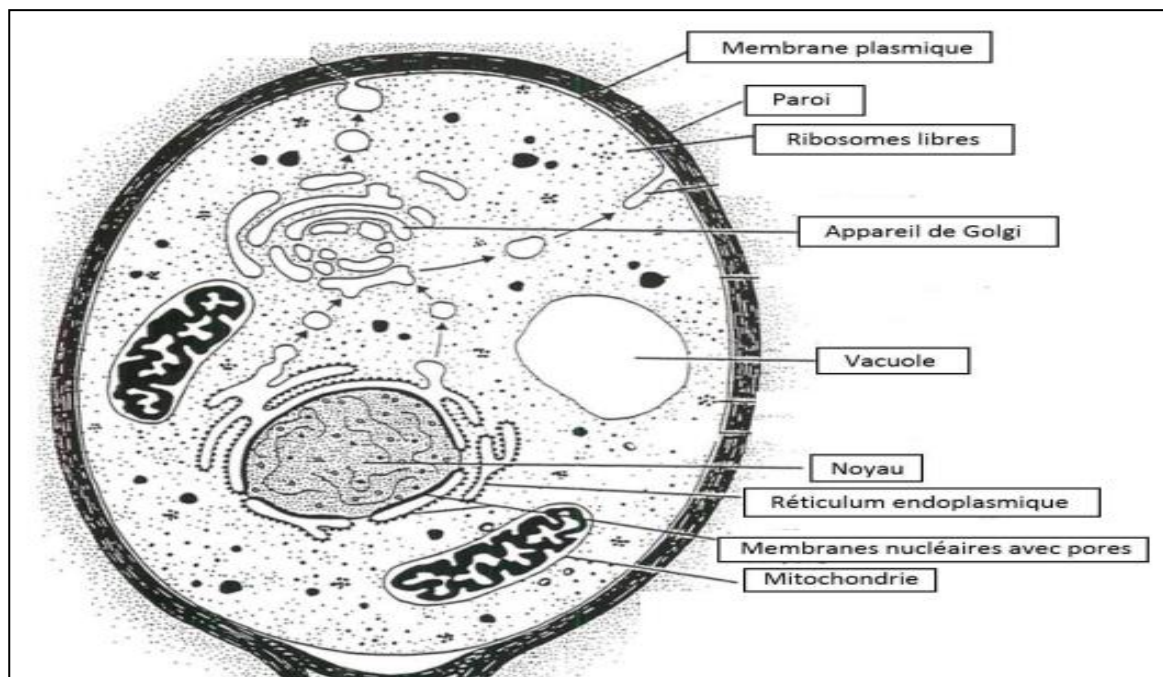
-**Noyau** : il est en position centrale, son diamètre est d'environ 1  $\mu\text{m}$ . Le noyau contient 16 paires de chromosomes. Il est protégé par la membrane nucléaire. Le noyau contrôle la synthèse protéique et il est constitué d'un nucléole et d'un nucléoplasme (Guinet et Godon, 1994 ; Thuriaux, 2004).

-**Les ribosomes** : sites de synthèse des protéines (poitrenaud, 2003).

-**Le réticulum endoplasmique et les corps de Golgi** : un réseau de membranes impliqués dans la sécrétion de protéines. (poitrenaud, 2003).

-**Les mitochondries** : corps producteurs d'énergie dans la cellule en présence d'oxygène (poitrenaud, 2003).

-**Vacuoles** : Le nombre et la taille des vacuoles sont déterminés par l'âge des cellules. Les vacuoles, abondantes dans les hydrolases, sont le site privilégié des réactions de dégradation. Ils servent également de référentiel pour les acides aminés, les purines et d'autres éléments qui doivent être métabolisés (Castan, 2016).



**Figure 05** : Représentation schématique d'une cellule de *Saccharomyces cerevisiae* (Larpent et Larpent-Gourgaud, 1997)

La composition de la levure dépend de son type et des conditions dans lesquelles elle est stockée :

**-Les protéines :** parce qu'ils contiennent un grand nombre d'enzymes, ils peuvent potentiellement contribuer à un niveau élevé d'activité métabolique. Par conséquent, la teneur en protéines est directement liée à la capacité de fermentation et à la capacité de production de biomasse (Maggiar, 2014).

**-Les glucides :** sont principalement des glucanes et mannanes, les constituants muraux sont représentés par le glycogène, une macromolécule de stockage que l'on trouve dans les cellules animales, qui est utilisé lorsqu'il y a une carence à long terme en nutriments ; Tréhalose, un disaccharide qui est appelé quand il y a une carence à court terme. Le stockage de ce sucre est très important que la cellule de levure doit subir un stress, comme le séchage, élevée pression osmotique (poitrenaud, 2003).

**-Les lipides :** Les lipoprotéines et les phospholipides, en particulier, interviennent dans la composition de la membrane cytoplasmique et le maintien de ses propriétés dans les nombreux procédés utilisés pour sécher la levure, ainsi que dans le stockage de diverses substances (Beney et Gervais ,2001).

**-Les minéraux :** y compris le phosphore, qui est essentiel dans la formation des acides nucléiques, les molécules à fort potentiel énergétique (ATP), et les phospholipides de la membrane (Larpent et Larpent-Gourgaud, 1997).

#### II.2.4. Métabolisme

*Saccharomyces cerevisiae* utilise deux types de métabolisme différents pour produire de l'énergie ; selon la présence ou l'absence d'oxygène, il y a le métabolisme oxydatif (en aérobiose) et le métabolisme fermentaire (en anaérobiose) (De Deken, 1966 ; NguyenetCastan, 2016).

##### II.2.4.1. Métabolisme oxydatif (en aérobiose)

En aérobiose, le rendement théorique de production de biomasse est de l'ordre de 0,5 g de matière sèche par gramme de glucose consommé, le quotient respiratoire (QR = quantité de dioxyde de carbone / quantité de dioxygène) est inférieur à l'unité, et l'éthanol n'est que détecté à l'état de traces (Käppeli, 1986 ; Käppeli et Sonnleitner, 1986 ; Larpent, 1990).

La première phase de la dégradation du substrat chez la levure *Saccharomyces* est la glycolyse, aussi appelée voie d'Embden-Meyerhof. L'hydrolyse de l'amidon aboutit à la formation de glucose et l'hydrolyse du saccharose à la formation de glucose et de fructose (Riess, 2012). La première étape est le transport du glucose, et/ou du fructose, du milieu extérieur au milieu intérieur. Le fructose rejoint la glycolyse après avoir été phosphorylé en fructose 6 phosphate. La transformation du glucose ou du fructose par la glycolyse produit 2 pyruvates et a un bilan net de 2 ATP Adénosine Triphosphate et de 2 NADH+H<sup>+</sup> (Nicotinamide adénine dinucléotide). Ces NADH+H<sup>+</sup> seront réoxydées au niveau de la chaîne de transporteurs d'électrons ce qui permettra à la cellule la production d'énergie sous forme de gradient membranaire de protons pouvant être utilisés pour le transport membranaire ou la production d'ATP (Campbell et Reece, 2004).

Après la glycolyse le pyruvate peut être orienté, soit vers le cycle de l'acide citrique soit vers la production d'éthanol. Lorsque le pyruvate est présent en grande quantité dans la cellule, suite à une activité glycolytique intense, il est orienté vers la production d'éthanol (Riess, 2012).

Le cycle de l'acide citrique, aussi appelé cycle de Krebs, consiste en une succession de réactions d'oxydations et de décarboxylations, Cela permet la réduction de FAD (flavine adénine dinucléotide) en FADH<sub>2</sub> et de NAD<sup>+</sup> (nicotinamide adénine dinucléotide) en NADH+H<sup>+</sup> ainsi que la production d'un GTP (guanosine triphosphate) qui sera convertie en ATP. L'ATP est une molécule utilisée chez tous les organismes vivants pour fournir de l'énergie aux réactions chimiques. Le FAD et le NAD<sup>+</sup> sont des coenzymes d'oxydo-réduction. Ceux-ci peuvent être soit utilisés par la cellule pour accomplir des réactions rédox ou peuvent, sous leurs formes réduites, donner leurs électrons à des protéines membranaires. Chaque cycle produit un FADH<sub>2</sub> et trois NADH+H<sup>+</sup> ; une fois réoxydés grâce à la chaîne de transporteur d'électrons ils peuvent produire jusqu'à 11ATP. Les réactions du cycle de Krebs sont effectuées, chez les eucaryotes comme les levures, par les mitochondries)(Riess, 2012). Les cofacteurs réduits NADH et FADH<sub>2</sub> produits par la glycolyse et le cycle de Krebs sont réoxygénés au niveau de la chaîne respiratoire dans ces conditions (Celton, 2011 ; Ehsaniet *al.*, 2009).

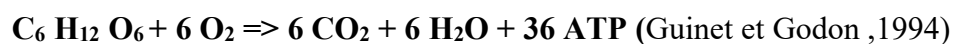
Le NADH+H<sup>+</sup> et FADH<sub>2</sub>, produits au cours des étapes précédentes, sont des molécules riches en énergie car elles possèdent une paire d'électrons ayant un haut potentiel de transfert. La phosphorylation oxydative désigne le processus par lequel l'ATP est formée lorsque des électrons sont transférés du NADH+H<sup>+</sup> ou du FADH<sub>2</sub> à l'oxygène qui est pour *Saccharomyces cerevisiae* l'accepteur final d'électron par une série de transporteur

d'électrons. Chez les eucaryotes, comme les levures, la chaîne de transport d'électrons est localisée dans la membrane interne des mitochondries. (Riess, 2012). L'oxydation du  $\text{NADH} + \text{H}^+$  donne 3 ATP et celle du  $\text{FADH}_2$  donne 2 ATP. Les chaînes respiratoires contiennent de nombreux transporteurs d'électrons comme les cytochromes. Le transfert d'électrons conduit à un transfert de protons à l'extérieur de la matrice mitochondriale. Une force motrice est générée consistant en un gradient de pH et un potentiel électrique transmembranaire. L'ATP est synthétisée quand les protons reviennent dans la matrice mitochondriale à travers l'ATP synthase. L'oxydation et la phosphorylation sont donc couplées par un gradient de protons établi à travers la membrane mitochondriale interne (Riess, 2012).

Le glucose 6-phosphate est à la fois le substrat de la glycolyse et celui de la voie des pentoses phosphates. Le choix entre ces deux voies dépend des exigences cellulaires ponctuelles en énergie métabolique (ATP), en précurseurs biosynthétiques et en potentiel redox. En effet, la voie des pentoses phosphates sert à la production de NADPH qui est indispensable aux réactions d'oxydoréduction des levures (Cipollina et col. 2009). Alors que la glycolyse est ralentie lorsque la charge énergétique est élevée, le glucose 6-phosphate déshydrogénase (et donc la voie des pentoses phosphates) est inhibée par des concentrations élevées de NADPH et par les intermédiaires de la biosynthèse des acides gras. Ceci permet un maintien de l'équilibre entre l'énergie et le pouvoir réducteur contenu dans la cellule (Riess, 2012).

En présence d'oxygène et lorsque la concentration en glucose est inférieure à  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , la levure *Saccharomyces cerevisiae* présente un métabolisme oxydatif (Verduynet *al.*, 1984) (**Figure 06**). Dont lequel, le glucose est dégradé en  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CO}_2$ , avec production d'énergie sous forme d'ATP et d'intermédiaires nécessaires à la croissance, par les voies de la glycolyse, des pentoses phosphates, du cycle de Krebs et de la phosphorylation oxydative. Cette énergie est utilisée pour la maintenance et la croissance de la levure (Amillastre, 2012)

L'équation globale de métabolisme oxydatif est :



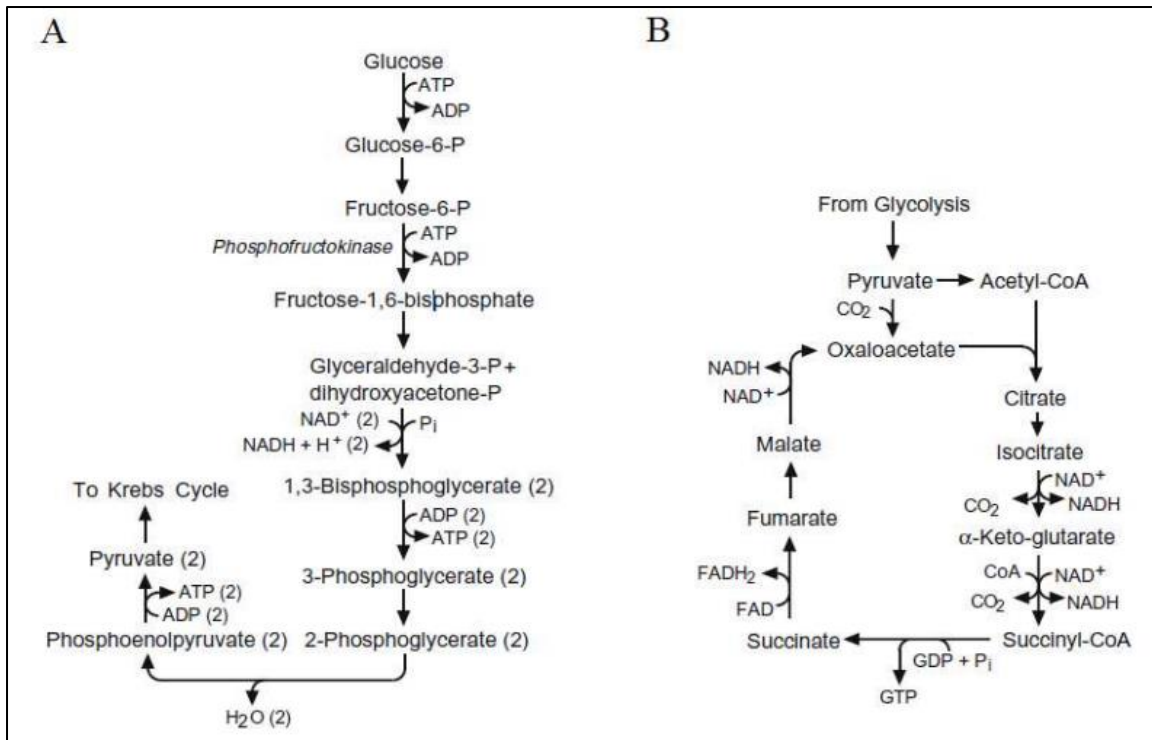
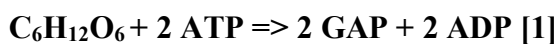


Figure 06 : Les étapes de glycolyse(A) et de cycle de krebs(B) (Fritsche, 1972).

#### II.2.4.2. Métabolisme fermentaire (en anaérobiose)

Au cours de la fermentation par les levures, le glucose est transformé en pyruvate par la voie de la glycolyse ou « voie d'Embden-Meyerhof ». La glycolyse a lieu dans le cytosol de la levure et permet l'assimilation des sucres d'un milieu par la cellule (Urien, 2015).

Dans un premier temps, la dégradation du glucose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) en glycéraldéhyde-3-phosphate (GAP) met en jeu une chaîne de quatre réactions enzymatiques et implique la dégradation de deux molécules d'adénosine triphosphate (ATP) en adénosine diphosphate (ADP) (Figure 07).



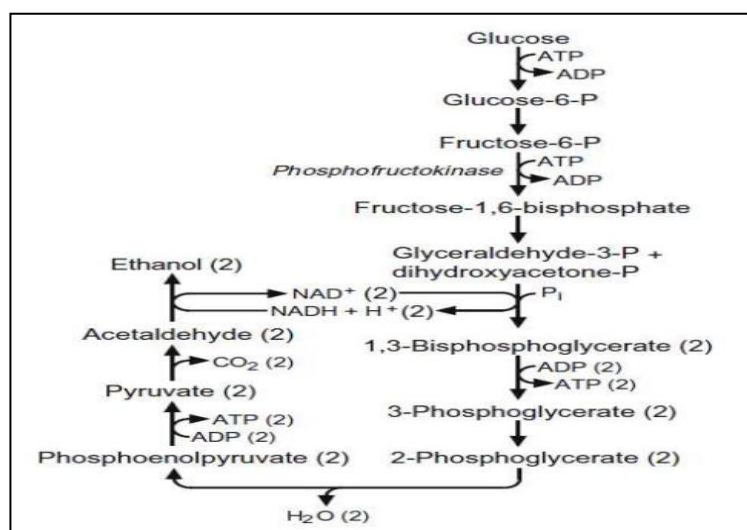
Dans un second temps, la conversion du GAP en pyruvate (CH<sub>3</sub>COCOO<sup>-</sup>) permet la récupération d'une partie de l'énergie du GAP sous forme d'ATP et il y a formation de NADH. 2 GAP + 4 ADP + 2 H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> + 2 NAD<sup>+</sup> ⇒ 2 CH<sub>3</sub>COCOO<sup>-</sup> + 4 ATP + 2 NADH + 2 H<sup>+</sup> + 2 H<sub>2</sub>O [2]

D'après [1] et [2], le bilan de la glycolyse s'écrit : C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> + 2 ATP + 2 ADP + 2 H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> + 2NAD<sup>+</sup> ⇒ 2 CH<sub>3</sub>COCOO<sup>-</sup> + 4 ATP + 2 NADH + 2 H<sup>+</sup> + 2 H<sub>2</sub>O

Ensuite, la voie de la fermentation transforme le pyruvate issu de la glycolyse et il y a production d'acétaldéhyde, puis d'éthanol ( $C_2H_5OH$ ) via une réaction d'oxydation du NADH. C'est la production finale d'éthanol qui donne son nom à la « fermentation alcoolique » (Käppeli et Sonnleitner, 1986). L'équation globale de la fermentation alcoolique a été décrite dès 1815 par Louis Joseph Gay-Lussac :



Il faut noter que les levures sont capables de cataboliser d'autres monosaccharides que le glucose, comme le fructose et le mannose qui sont phosphorylés en fructose-6-phosphate et entrent dans la glycolyse. Les disaccharides, comme le maltose, le saccharose et le lactose doivent être, quant à eux, hydrolysés en monosaccharide par des hydrolases ou phosphorylase. Les polysaccharides, que l'on trouve dans les produits à fermenter, comme l'amidon des végétaux ou le glycogène des animaux, sont dégradés en mono et disaccharides par des amylases, notamment celles de bactéries et des mycètes. (Urien, 2015). Le rendement théorique de conversion du glucose en éthanol est de 0,511 g éthanol/g glucose (Jacobson, 2006 ; Jacques *et al.*, 2003), mais la formation de composés secondaires, les réactions de maintien et la synthèse des constituants cellulaires la limite en pratique à un intervalle de 0,1 à 0,5 g éthanol/g glucose (Käppeli, 1986), le rendement en glycérol est de 0,027 g glycérol/g glucose à 27°C (**Figure 07**) (Aldiguier, 2006). L'un des rôles du glycérol est de rééquilibrer le bilan redox de la cellule (Nevoigt et Stahl, 1997).



**Figure 07** : Les étapes de métabolisme en anaérobiose (Faria-Oliveira *et al.* 2013).

## II.2.5. Reproduction

*Saccharomyces cerevisiae* est un organisme qui possède un système génétique élégant et largement exploité (Hartwell, 1974).

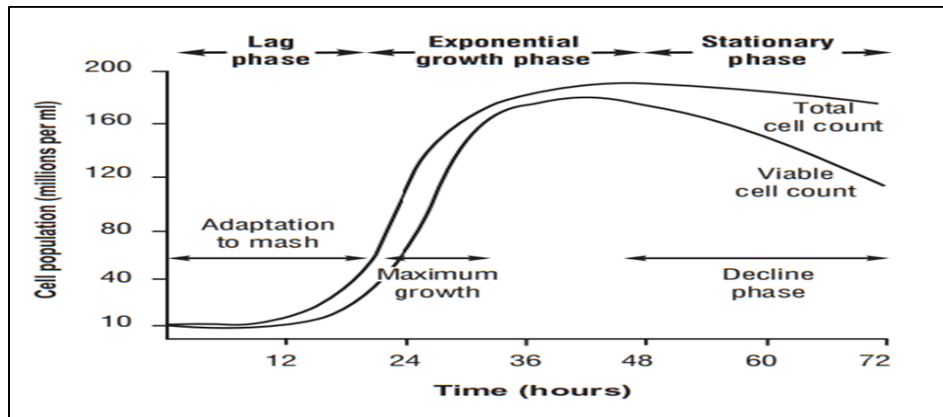
### II.2.5.1. Phases de croissance cellulaire

La croissance de la levure se produit principalement en quatre phases : latence, exponentielle, stationnaire et déclin sont représentés dans la courbe (**Figure08**). Elle peut être distinguée plus précisément en ajoutant deux phases : une phase d'accélération et une phase de décélération. Le terme est souvent utilisé pour décrire les courbes de croissance dans les milieux liquides, mais la croissance cellulaire dans les milieux solides présente des étapes similaires (Ronot, 1998 ; Nguyen, 2016).

La phase de latence ; pendant ce temps, la levure s'adapte à son nouvel environnement et active son système métabolique. C'est une période sans croissance, mais avec beaucoup d'activité biochimique, car la cellule de levure s'adapte aux conditions de cultures précédentes de l'environnement A la fin de ce stade les cellules commencent la première division cellulaires uivi par la phase d'accélération, dont lequel le taux de division augmente continuellement (Russell, 2003 ; Gray *et al.*, 2004 ; Allen *et al.*,2006).

La phase exponentielle et la phase stationnaire sont les deux phases les plus essentielles de la courbe de croissance pour les études fondamentales ou les applications industrielles. Dans la phase exponentielle, les cellules se divisent rapidement et le taux de division et de croissance est influencé par la qualité nutritionnelle de l'environnement, lorsque les niveaux de nutriments essentiels sont épuisés, la croissance cellulaire ralentit ou s'arrête complètement et les cellules entrent en phase stationnaire , la levure contient plus de tréhalose et de glycogène que dans les autres phases (Michael Breitenbach *et al.*, 2004). Les cellules de la phase stationnaire sont capables de résister à un grand nombre de stress (Werner Washburne *et al.*, 1993).

Phase de déclin ; Au cours de cette phase, le taux de mortalité des cellules de levure dépasse le taux de natalité et le nombre total de cellules diminue (Russell,2003).



**Figure 08 :** Courbe de croissance par lots typique pour la levure (Russel,2003)

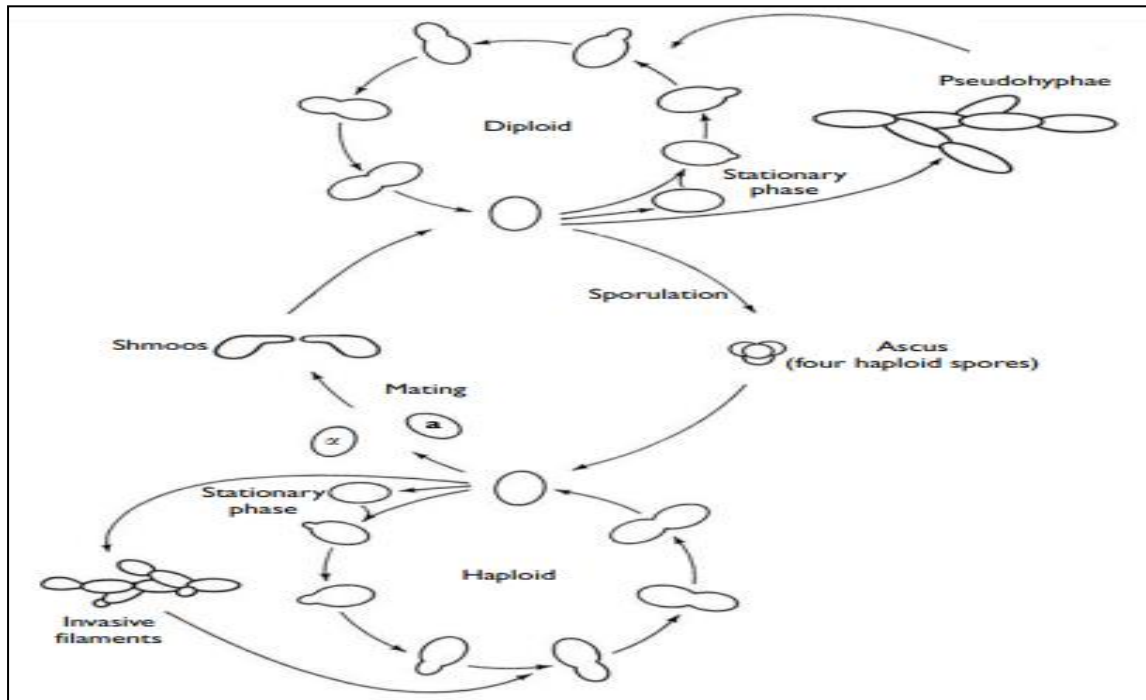
### II.2.5.2. Cycle de vie

La levure *Saccharomyces cerevisiae* existe sous deux formes : haploïde ou diploïde, qui peuvent subir deux types de divisions cellulaires : la reproduction végétative et la reproduction sexuée. Une ploïdie est une répétition chromosomique. Lorsque tous les chromosomes d'une cellule sont identiques, la cellule est dite haploïde ( $n$  chromosomes). Les diploïdes, quant à eux, sont des cellules à doubles chromosomes ( $2n$  chromosomes) (Parry et al. 1979). La reproduction cellulaire diffère selon le génotype de la création de la cellule.

La **Figure 09** décrit le cycle de vie de *Saccharomyces cerevisiae*. Les haploïdes ( $a$  ou  $\alpha$ ) produisent des phénomènes (facteur  $a$  ou  $\alpha$ ) qui sont détectés par des cellules sexuellement opposées (Knop,2011). La fusion cellulaire et nucléaire de deux cellules haploïdes aboutit à la génération d'une cellule diploïde, qui se multiplie ensuite par bourgeonnement (reproduction végétative) ou formation de spores (Knop, 2006). Les cellules diploïdes ( $a$  et  $\alpha$ ) se reproduisent uniquement à l'état végétatif et donne naissance à de nouveaux diploïdes. Une nouvelle cellule est formée par division de sa cellule « mère ». la surface, ou la cellule « mère » forme un bourgeon. Pendant la croissance du bourgeon, le noyau de la cellule mère se divise (mitose) (Fagarasanu et Rachubinski, 2007 ; Macara et Mili, 2008) Une paroi cellulaire se forme entre la cellule mère et le bourgeon. Lors que la taille de la nouvelle cellule atteint  $2/3$  de celle mère, elles se séparent et deviennent deux cellules individuelles (Rupeš et al., 2002 ; Michael Breitenbach et al., 2004).



L'observation de sporulation chez les diploïdes (méiose) (Michael Breitenbach *et al.*, 2004 ; Knopet *al.*, 2011 ; Ibáñez *et al.*, 2014). Suit à cette étape quatre cellules haploïdes sont formées. Lorsque les nutriments du milieu sont limités (condition de sporulation), les diploïdes forment les spores et produisent des haploïdes qui ont des gènes différents de leur cellules mères (Michael Breitenbach *et al.*, 2004). Des auteurs ont reporté l'avantage de l'adaptation des cellules diploïdes comparées à celles haploïdes (Kondrashov et Crow, 1991 ; Thompson *et al.*, 2006).



**Figure 09** : cycle de vie de *Saccharomyces cerevisiae* (Michael Breitenbach *et al.* 2004)

### II.2.6. Origine des différentes souches de la levure

Les souches de *Saccharomyces cerevisiae* peuvent être isolées à partir de diverses sources, y compris le sol, les fruits (raisins secs), la sève des arbres, etc. Elles ont des propriétés physiologiques distinctes (Barbara *et al.* 2012). Cette diversité démontre leur capacité à s'adapter à une variété de conditions environnementales. Ces différences sont dues à une importante diversité génétique liée à l'origine géographique et aux sources d'isolement (Jespersen *et al.* 2003 ; Fay et Benavides, 2005 ; Aa, Townsend *et al.* 2006).

### II.2.7. Conditions de culture

*Saccharomyces cerevisiae* peut être cultivé dans des milieux liquides ou solides. L'énergie et les nutriments dont la levure a besoin pour croître et proliférer doivent être assurés (Ferreira, 1997 ; Rzyvy, 2005). La connaissance des conditions de culture permet de produire des levures aux propriétés intéressantes. Deux types de milieux peuvent être

utilisés pour cultiver la levure : les milieux sélectifs riches et les milieux synthétiques (Amillastre, 2012 ; Nguyen, 2016). Le milieu doit fournir tous les éléments et besoins énergétiques nécessaires à la croissance des levures. La biomasse est principalement composée d'eau et d'éléments CHON (carbone, hydrogène, oxygène, azote) ; par conséquent, l'environnement doit fournir ces éléments pour faciliter la croissance (Käppeli et Sonnleitner 1986 ; Leveau et Bouix, 1993 ; Russell 2003).

**Tableau 02** : Sources et fonctions des éléments nutritionnelles essentiels à la croissance de *S. cerevisiae* (Salma, 2013).

Élément	Sources	Fonctions cellulaires
Carbone	Sucres simples, polysaccharides, acides gras	Élément structural en combinaison avec O, H et N ; source d'énergie du métabolisme
Oxygène	Air/O <sub>2</sub>	Oxydant de la chaîne respiratoire, synthèse des stérols
Azote	Sels d'ammonium, urée, acides aminés	Composant des protéines et enzymes
Phosphore	Phosphates	Acides nucléiques, phospholipides, transduction d'énergie
Hydrogène	Hydrates de carbones, protons de l'environnement acide, etc.	Régulation du pH intracellulaire, force proton-motrice
Soufre	Sulfates, méthionine	Acides aminés et vitamines protéines Fer Soufre
Potassium	Sels de potassium	Equilibre ionique, activité enzymatique
Magnésium	Sels de magnésium	Activité enzymatique Magnésium sels de magnésium Activité enzymatique
Calcium	Sels de calcium	Transduction de signal
Cuivre	Sels de cuivres	Oxydant
Fer	Sels de fer	Cytochromes/protéines Fer Soufre
Manganèse	Sels de manganèse	Activité enzymatique
Zinc	Sels de zinc	Activité enzymatique

### **II .3. Influence des paramètres environnementaux sur la levure**

Tout au long des procédés de fermentation, les levures peuvent être affectées par un enchaînement de stress qui vont influencer leur métabolisme et réduire la viabilité cellulaire et les performances des procédés (Attfield, 1997).

#### **II.3.1. Influence du pH**

Le pH des levures varie de 5,0 à 5,2. (Russell, 2003). Du fait que leur enveloppe est imperméable aux ions H<sup>+</sup> et OH<sup>-</sup>, les levures peuvent tolérer une large gamme de pH extracellulaire, et il n'y a pas de croissance en dehors de cette gamme (Verduyn *et al.*, 1990). Le pH a un impact important sur la formation de glycérol et d'acides organiques. Leur concentration augmente à mesure que le pH augmente (Leveau et Bouix, 1993 ; Russell, 2003).

#### **II.3.2. Influence de température**

La température est le facteur environnemental le plus important influençant la physiologie et l'activité des micro-organismes (Watson, 1987). Elle influence le taux de croissance, le taux de production d'éthanol, le taux de production de CO<sub>2</sub>, la viabilité cellulaire, la composition et l'intégrité de la membrane plasmidique, etc. (Lee *et al.* 1981 ; Watson, 1987 ; Gervais et Martnez De Maraón, 1995 ; Beney et Gervais, 2001 ; Aldiguier *et al.*, 2004). La croissance à des températures supérieures à la limite provoque une dégradation des enzymes, une altération de la membrane (Fintan Walton et Pringle, 1980 ; Gervais et Martnez De Maraón 1995 ; Martnez De Maraón *et al.* 1999 ; Guyot *et al.*, 2005) et l'altération des protéines (Watson, 1987).

#### **II.3.3. Influence de L'éthanol**

Les espèces microbiennes actuellement utilisée au niveau industriel pour la production d'éthanol sont *Saccharomyces cerevisiae* (Didderen *et al.*, 2008 ; Riess, 2012). Cette dernière donne un meilleur rendement en éthanol et une meilleure productivité parce que biomasse est moins produite et le métabolisme est plus intensif. (Schmid, 2005).

La présence d'éthanol est un facteur important rencontré lors de la production d'alcool .La levure est inhibée par sa propre synthèse d'éthanol. Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer cette suppression, parmi ces mécanismes : dénaturation et inhibition des enzymes glycolytiques (Grayet Sova 1969), l'inhibition du transport du glucose (Leao et Van Uden ,1985), un changement de la membrane et sa perméabilité (Jeffries et Jin 2000), une accélération du flux entrant protons, une diminution des températures de croissance optimales et une augmentation de la mort naturelle (Lee *et al.* 1980 ; D'Amore et Stewart ,1987).

### **II.3.4. Influence d'oxygène**

La macération du vin rouge apporte suffisamment d'oxygène au moût, ce qui peut répondre aux besoins des levures (Ribéreau - Gayon *et al.* 2006). A une température de 30°C, la concentration en oxygène à saturation peut atteindre 7 à 8 mg/L. (Nissen *et al.* 2003). Cet oxygène est rapidement utilisé par les levures en phase de croissance, principalement par la respiration mitochondriale et seulement 15 % par les voies métaboliques qui produisent les stérols et les acides gras insaturés (Salmon *et al.* 1998), nécessaires aux membranes cellulaires précédemment citées (Valero *et al.*, 1998).

### **II.4. L'application de la levure *Saccharomyces cerevisiae***

La levure de bière est devenue un micro - organisme préféré dans plusieurs domaines avec des applications variées, en raison de ses nombreux avantages et bienfaits (Lefebvre, 1991 ; Goulet, 2009).

#### **II.4. 1.L'application en vinification**

Le vin est défini comme « le produit obtenu exclusivement par la fermentation alcoolique (FA), entier ou partiel, de raisins secs frais, foulés ou non, ou de raisins moûts » (Ribéreau et Gayon, 1991). De ce fait, la FA est la dernière étape de la vinification. Elle est une conversion biologique des sucres des raisins secs (principalement du glucose et du fructose) en éthanol et en dioxyde de carbone. Cette synthèse alcoolique s'accompagne de la formation de produits secondaires comme le glycérol, l'acide acétique, l'acide succinique, les alcools supérieurs, les esters, etc. (Swiegers *et al.*, 2005). Actuellement, la FA est mise en œuvre à l'aide de levains et de souches de *S. cerevisiae* facilement disponibles choisis pour leur capacité fermentaire et leur apport aromatique. Quelle que soit la méthode utilisée, la FA doit être rapide. La multiplication des levures dans le vin doit être suffisante pour assurer la FA des sucres efficaces et inhiber le développement de d'autres microorganismes (Lai, 2010).

#### **II.4. 2.L'application en industries agro-alimentaire**

Les autolysats de levure sont ajoutés aux aliments à raison de 1 à 3% dans les industries agro-alimentaires pour en améliorer la qualité nutritionnelle. Les autolysats sont issus de l'autolyse partielle des cellules de levure par leurs propres enzymes et présentent l'avantage d'être peu salins. La levure de bière est utilisée à diverses fins dans les industries agricoles et alimentaires (Maggiar, 2014). En raison de sa teneur en acide glutamique, la levure est un ingrédient aromatisant et exhausteur de goût. Sous forme d'autolysats, elle est ensuite utilisée dans la fabrication de potages, cubes de bouillon, fonds de volaille et sauces, permettant de mettre en valeur les saveurs tout en conférant une saveur de volaille et de fromage. Elle agit comme adjuvant, empêchant l'épaississement de la texture (fromagerie, charcuterie), et elle stabilise la viscosité des pâtes liquides ou semi-liquides (crêpes, gaufrettes...) (Hencke, 2000).

#### **II.4. 3.L'application dans la fabrication de pain**

Le pain est fait de farine, de levure ou de levain, de sel et d'eau (Figure 10) (Godon, 1981). C'est l'activité chimique de la levure qui provoque la libération de bulles de dioxyde de carbone et fait gonfler la pâte à pain (Nguyen, 2016). Partant de cette question, plusieurs levures sont commercialisées pour faciliter et optimiser la fabrication du pain. Une solide compréhension du comportement de la levure est nécessaire, telle que la compréhension de la résistance de la levure pendant la déshydratation pour produire de la levure sèche active (Williams et Pullen, 2007).



# CHAPITRE III

Application de  
*Saccharomyces cerevisiae*  
dans la panification

## Introduction

Les origines du pain remontent au Néolithique, il y a plus de 12000 ans. Il existe aujourd'hui plusieurs revues scientifiques traitant des sciences et technologies céréalières, ce qui indique l'effort de recherche consacré à l'amélioration de la qualité des produits de panification (Mondal et Datta, 2008). Malgré cela, les mécanismes qui interviennent au sein d'un produit de boulangerie tout au long de sa transformation ne sont pas tous clairement définis en raison de sa complexité (Gally, 2017).

### III.1. Définition

La souche *Saccharomyces cerevisiae* est un agent dans la fabrication d'un certain nombre de produits de boulangerie, comme les gâteaux et les crackers, les pains... (De Vuyst, Gänzle, 2005). Selon le décret exécutif n°91-572 du 31 décembre 1991 relatif à la farine de panification et au pain, la dénomination « pain » s'applique à la pâte fermentée composée de farine de panification ou de préparation pour panification conforme aux normes, additionnée d'eau, des souches du genre *Saccharomyces* et cuite conformément aux bonnes pratiques de fabrication.

*Saccharomyces cerevisiae* (levure de boulanger) existe principalement sous deux formes : Forme fraie en petits cubes achetée en boulangerie, elle supporte la congélation pendant plusieurs mois mais ne tient que quelques jours au réfrigérateur (maximum dix jours). Forme sèche en sachets achetée en grandes surfaces, elle peut être stockée plus longtemps (jusqu'à un an) à température ambiante, loin de la lumière, de l'humidité et de l'air. Elle peut être utilisée directement, sans être réhydratée (Langraf, 2002).

### III.2. Les étapes de panification

Classiquement, le procédé de panification est divisé en phases de travail et de repos de la pâte (Levavasseur, 2007). Un schéma y compris ses différentes phases est illustré dans la **Figure 19** ; Les étapes de panification sont expliquées ci-dessous dans l'ordre du processus de fabrication du pain.

#### III.2.1. Pétrissage

C'est la première étape ou opération unique qui permet de bien mélanger les ingrédients (le frasage) et d'incorporer de l'air dans la pâte pour favoriser la multiplication des levures. Le pétrissage permet l'hydratation du gluten ainsi que la production de fibres (l'autolyse) qui fixent l'oxygène et les grains d'amidon, entraînant l'hydratation de l'amidon et sa transformation enzymatique en sucres (Roussel et Chiron, 2002). D'après Giannou et *al.* (2003), Le pétrissage doit être rapide, homogène et à température contrôlée. Le nombre et la taille des bulles de gaz ont un impact significatif sur les caractéristiques finales du produit.

Cependant, un pétrissage prolongé peut augmenter l'oxydation des groupements thiols (-SH) dans les protéines polymérisées. Il en résulte généralement une pâte affaissée sous l'effet des forces mécaniques appliquées à la pâte, qui réduisent le poids moléculaire des protéines (Ndangui,2015)

Au cours de cette étape un réseau glutineux est bien formé, il permet le confinement des granules d'amidon, des fibres et surtout des bulles d'air (Scanlon et Zghal, 2001). Les principaux composants des bulles d'air sont l'oxygène et l'azote. En raison de l'activité rapide des levures, la majorité de l'oxygène est consommée avant la fin du pétrissage (**Figure 10**). Le gaz carbonique produit par les levures est très soluble : il diffuse à travers les bulles de gaz et se dissout rapidement. En conséquence, il est incapable de créer des bulles dans la pâte et c'est l'azote qui est le responsable important de la formation des noyaux (Celhay, 2000 ; Cauvain, 2007) (**Figure 11**).

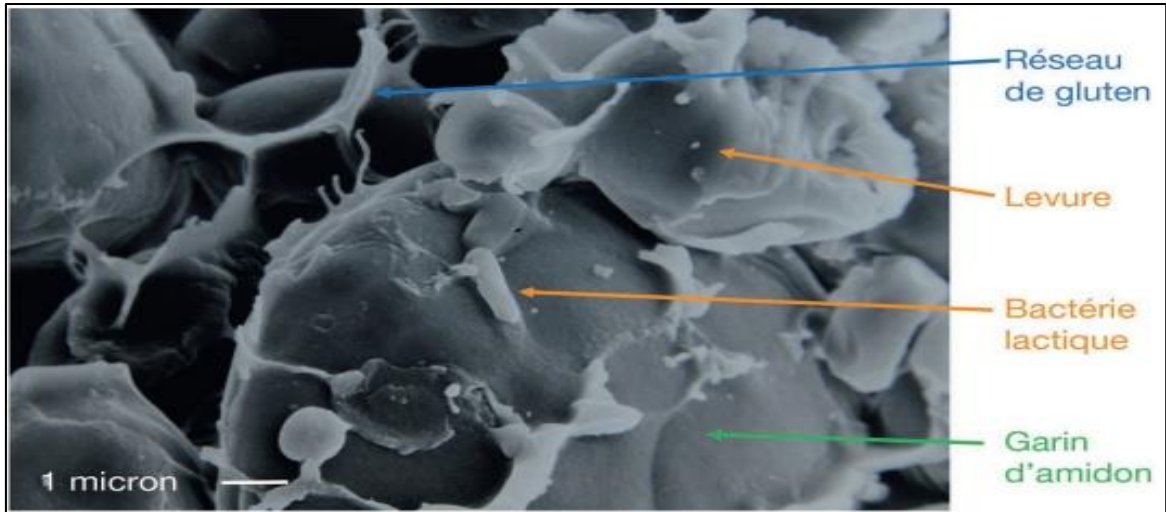


**Figure10** : Structuration de la pâte au cours du pétrissage (Roussel *et al.*, 2020).

### III.2.2. Fermentation

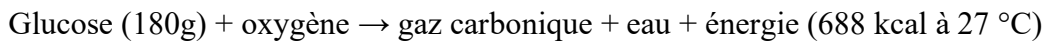
Pendant la fermentation, des enzymes (essentiellement  $\alpha$ -amylases) continuent d'hydrolyser l'amidon en sucres fermentescibles (glucose et maltose). Ceux -ci sont ensuite consommés par les levures qui les transforment en  $\text{CO}_2$  permettant le développement de la porosité ainsi la production d'éthanol et /ou d'acide lactique (Brangeret *et al.*, 2007). Il existe deux principaux types de fermentation pour la pâte à pain : la fermentation alcoolique, qui est réalisée par *Saccharomyces cerevisiae* et qui est la plus courante, et la fermentation lactique, qui est réalisée par des bactéries lactiques (qui sont fréquemment utilisées pour les pains au levain) (Therdthai, 2014).



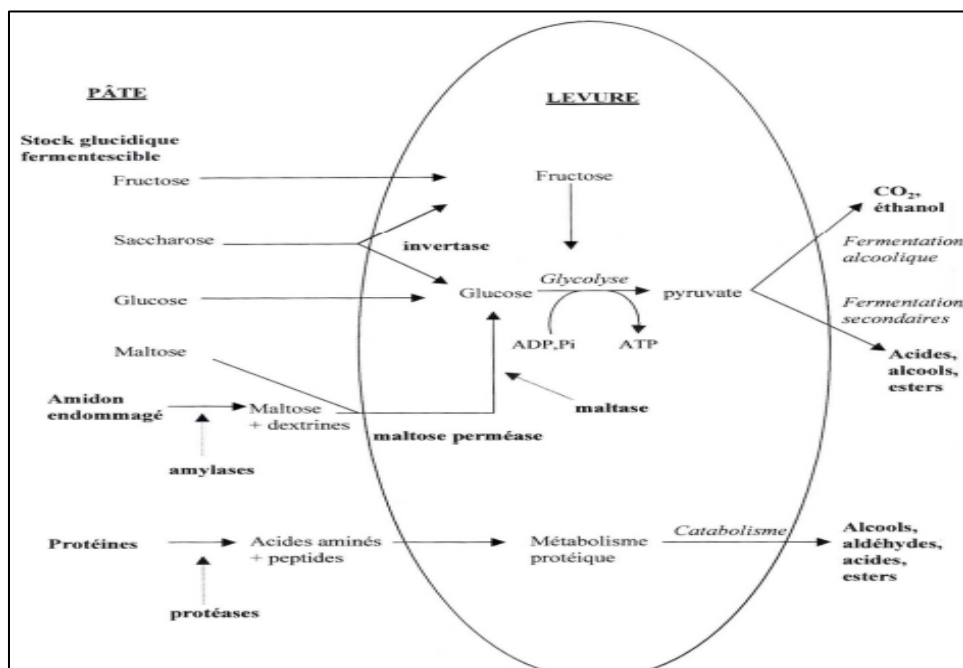
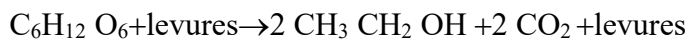


**Figure 11** : Morphologie de la pâte au cours de panification par microscope électronique (Onno ,1988)

*Saccaromyces cerevisiae* se comporte différemment en présence ou en absence d’oxygène(Boulemkahel, 2014).Selon Roussel et Chiron, (2003). L’oxygène introduit lors du pétrissage permetd’établir le métabolisme respiratoire selon la réaction suivant :



En anaérobiose, la majorité de la fermentation se produit au cœur de la pâte. La fermentation alcoolique de la levure transforme 95 % du glucose (Drapron *et al.*, 1999) suivant la réaction :



**Figure 12** : Rôle des hydrolases dans la fermentation (Potus *et al.*, 1996).

De ce fait, la fermentation reste une étape spécifique aux produits panifiés et a pour effet d'enrichir la pâte en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (Montel *et al.*, 2005). Il en résulte une perte totale de matière (environ 2% à 3%) en convertissant le sucre en alcool et en CO<sub>2</sub> accumulé dans le réseau. Elle se produit en deux étapes : dans un milieu non strictement anaérobie, la levure fermente les glucides libres dans la farine (environ 1%). Pendant ce temps, l' $\beta$ -amylase attaque les granules d'amidon endommagés lors de la digestion, formant du maltose et des dextrines ; la levure peut alors se développer grâce aux oses libérés. Du gaz carbonique, de l'alcool et des acides organiques sont produits lors de la fermentation proprement dite (Gally,2017). La protéine est principalement formée de gluten, qui provoque la croissance et la fusion des alvéoles. La résultante de l'augmentation du volume de la pâte (Chargelegue *et al.*, 1994) (**Figure 13**)



**Figure13** : Observation de l'aspect arrondi (prise de force) et du développement (activité de fermentation) des pâtes en fin de pointage (Roussel *et al.* 2020).

### III.2.2.1. Pointage

Le pointage ou piquage correspond à la toute première fermentation en cuve ou en bac, qui se produit au contact de la levure avec le mélange farine/eau ; il affecte toute la masse de la pâte. La fonction principale du pointage est de fournir de la force à la pâte. Cette force est causée par un changement de gluten. La pâte devient plus tenace, plus élastique et moins extensible. Le tissu glutineux formé a la capacité de retenir le dioxyde de carbone. De ce fait, le boulanger doit s'assurer que la pâte ne prenne pas beaucoup de force. Si tel était le cas, la division et le façonnage en machines seraient plus difficiles. Le deuxième rôle du pointage est de favoriser le développement des pains arômes (Langraf, 2002 ; Buche,2011).

### III.2.2.2. Division

La pâte de base doit ensuite être divisée en pâtons de différentes tailles selon le produit final recherché (baguette, bâtard, pain...). Cette opération peut être effectuée manuellement par le boulanger ou par des machines des diviseuses, qui se déclinent en deux variétés :

hydrauliques à couteaux et volumétriques à pistons (Buche, 2011 ; Ndangui, 2015). Après la division, les pâtons sont façonnés en petites boules de pâte. On dit qu'ils sont des boules, l'opération est connue sous le nom de mise en boule. Cela peut être fait à la main ou à la machine (Langraf, 2002).



**Figure 14** : Division de la pâte en fin de pointage  
(Triptolème, 2020)

### III.2.2.3. Détente

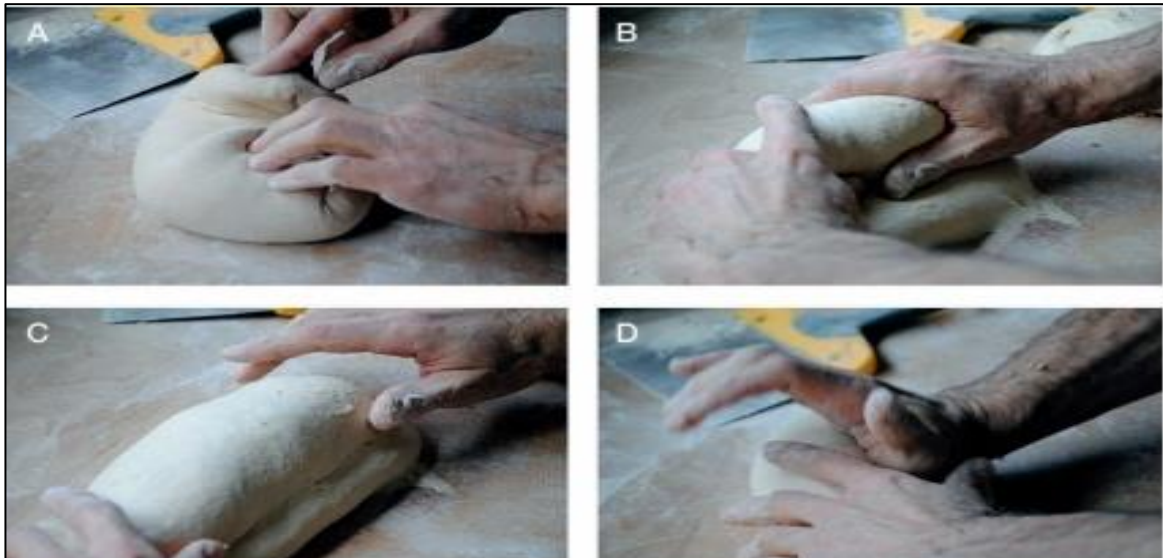
Les pâtons sont ensuite mis au repos pendant la période de relaxation quidure environ 20 minutes, généralement dans une chambre de repos avec des balancelles (Le vasseur, 2007 ; Roussel *et al.*, 2020).

### III.2.2.4. Façonnage

Le façonnage ou formation des pâtons peut avoir un impact significatif sur le goût, ou plus précisément, la mâche et la saveur de la mie et, par extension, la saveur du pain (Calvel, 1990). Cela peut être fait manuellement ou à l'aide d'une machine. Il existe des modes horizontales et obliques. La pâte est laminée, enroulée et allongée à l'intérieur. Dans le cas du façonnage manuel, le boulanger répète chaque pâton un par un (**Figure 15**). Le serrage des pâtons varie selon le degré de fermentation et la consistance de la pâte. Si une pâte manque de force, le serrage sera plus crucial.

Le serrage consiste à expulser le maximum de gaz carbonique de la pâte tout en maintenant une certaine cohésion dans le réseau glutineux. A cette étape, le boulanger travaille la pâte une dernière fois et donne sa forme définitive au pâton (Langraf, 2002). En effet, les contraintes imposées lors de la formation des pâtons vont avoir un effet sur les bulles de gaz réduisant leur taille tout en augmentant leur nombre (Levasseur, 2007).

### II.2.2.5. Apprêt



**Figure 15** : Différentes phases de façonnage sous forme de pâton allongé (A : pliages au centre ; B : partage du pâton ; C : pliage en deux ; D : soudure).

(Roussel *et al.*, 2020).

La deuxième étape de fermentation de la pâte est l'apprêt. Il se situe entre la fin du façonnage et la mise au four. Il est indispensable pour donner un bon volume au pain (**Figure 16 et 17**). Il permet principalement la levée du pâton due à l'émission de gaz carbonique. Une partie de l'amidon est convertie en sucres simples, qui sont ensuite transformés en alcool et en dioxyde de carbone par les enzymes de la levure (Ndangui, 2015).

Le temps d'apprêt varie selon le mode de fabrication : plus le temps de pointage est long, plus le temps d'apprêt est court. Il doit avoir lieu dans des conditions de température (entre 25 et 28 °C) et d'hygrométrie (entre 75 et 80 %). Il est plus facile de contrôler ces deux facteurs lorsqu'ils sont effectués dans des enceintes climatisées appelées chambres depousse contrôlée (Langraf, 2002; Buche,2011). Le gain de volume provoqué par l'expansion des petites alvéoles gazeuses lors de cette étape est important .si le nombre d'alvéoles initial est important, le nombre de bulles de gaz sera augmenté (Levavasseur, 2007).



**Figure16** : Apprêt en bannette. (Triptolème, 2020)



**Figure17** : Aspect des pâtons sur couche à la fin du temps d'apprêt (Roussel *et al.*, 2020).

### III.2.3. Cuisson

La cuisson est une étape complexe qui implique un certain nombre de transformations physiques, chimiques et biochimiques, telles que l'expansion du produit, l'évaporation, la formation d'une structure alvéolaire plus ou moins développée, la dénaturation des protéines, la gélatinisation de l'amidon, la formation de croûtes et les réactions de coloration (Sablani *et al.*, 1998). La température de cuisson varie selon les produits et les fours entre 180 et 250 °C pendant 20 à 30 minutes.

La température au centre de la pâte monte rapidement de 25 à 50 °C. Les ferments de levure dégradent les sucres en gaz carbonique. Cette dilatation de la pupille provoque une croissance rapide du pâton (Wiggins et Cauvain, 2007 ; Gally, 2017). Cette opération se poursuit jusqu'à ce que la température interne du pâton atteigne 50 °C. Les ferments sont alors détruits, signalant la fin du processus de fermentation. A partir de 60 °C. Il y a une gélatinisation de l'amidon, une dénaturation thermique des enzymes et une coagulation du gluten. Le développement de pain est complet. De 80 à plus de 100 °C, il y a une caramélisation et réaction de Maillard (Le vasseur, 2007) (**Figure 18**).



**Figure 18** : Pains en fin de cuisson dans un four à bois (Roussel *et al.*, 2020)

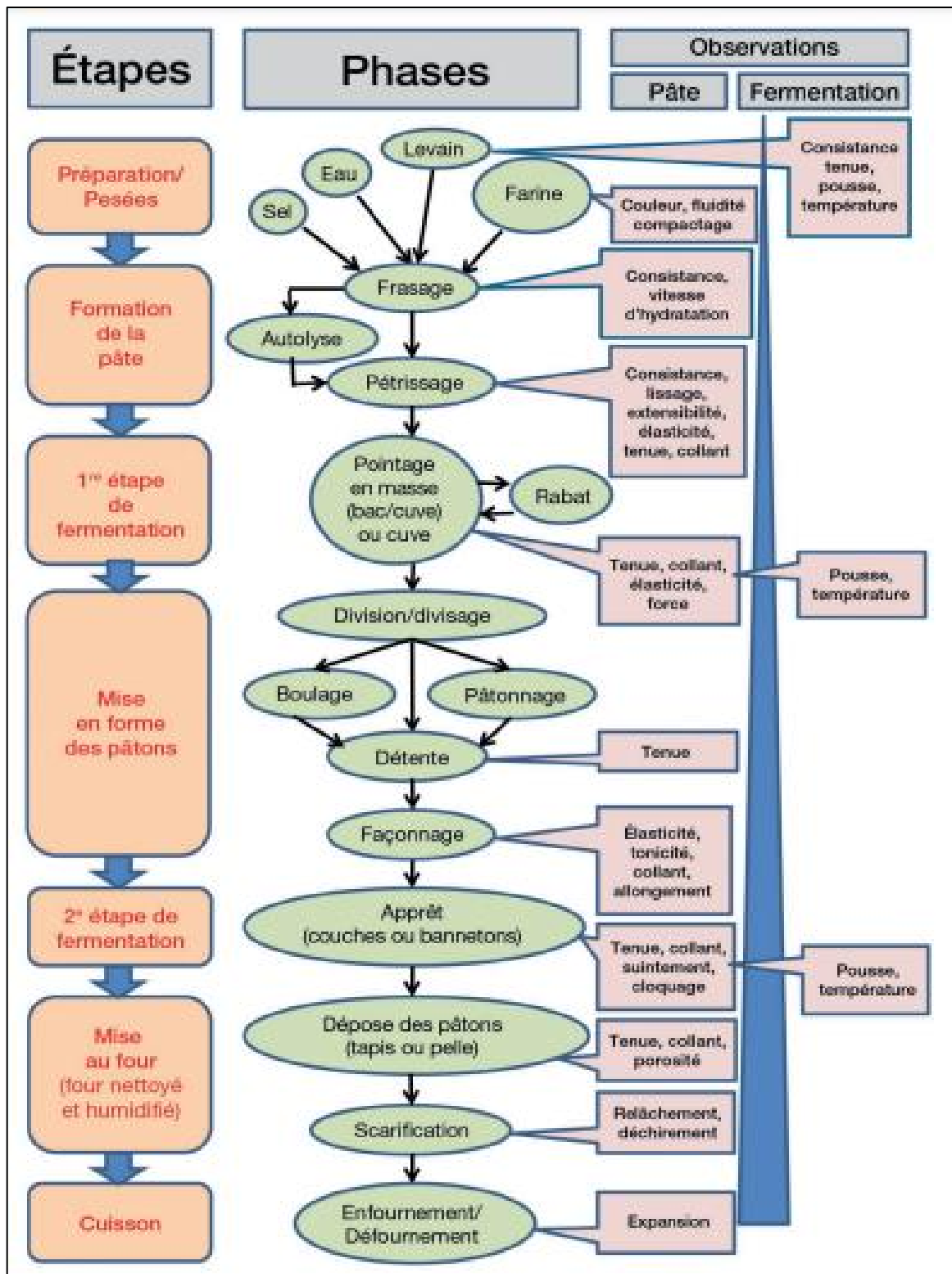


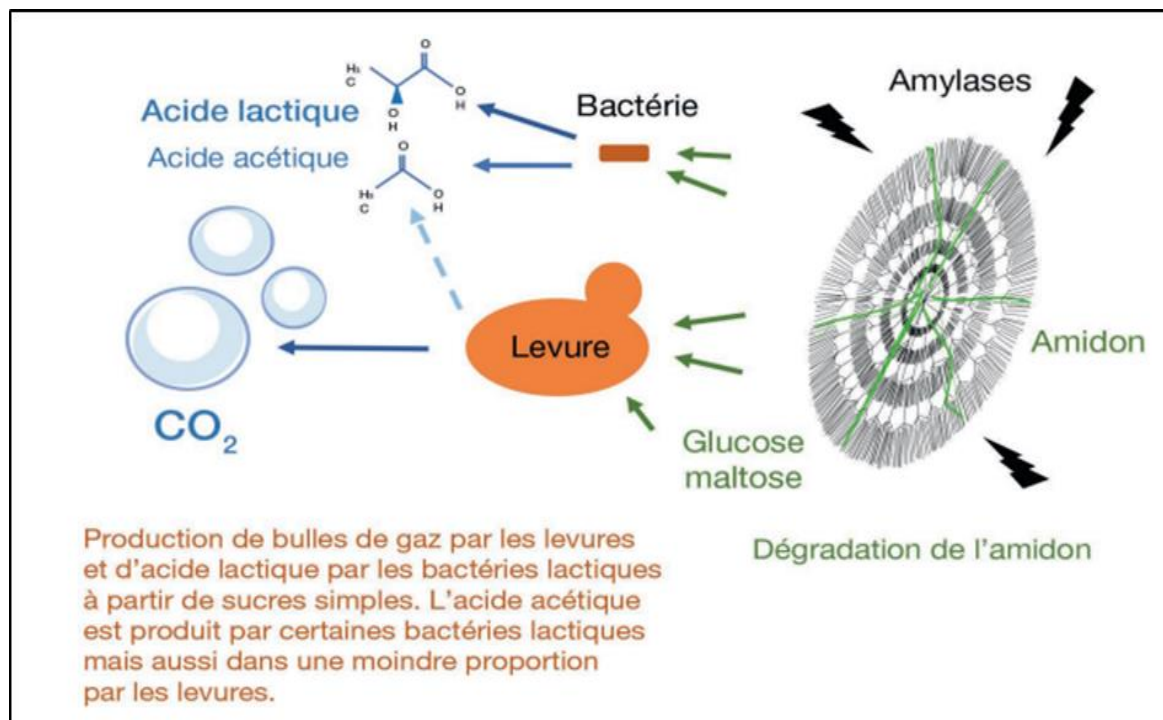
Figure 19 : Étapes du processus de panification et observations de la pâte (Roussel *et al.*, 2020).

### III.3. La souche *Saccharomyces cerevisiae* dans la panification

#### III.3.1. Les sources fermentescibles

La première source de sucres fermentescibles est le sucre présent dans la pâte au début du processus de panification : le glucose, le fructose, le saccharose et le maltose sont naturellement présents dans la pâte. La deuxième source est le saccharose ajouté par le boulanger (La quantité de sucre fermentescible ajoutée par le boulanger varie, mais peut atteindre 25 % p/p dans certains beignets sucrés) (Nagodawithana *et al.*, 1990). Dans les pâtes sucrées, la capacité des souches du genre *Saccharomyces cerevisiae* à fermenter dans des conditions de stress osmotique élevé est d'une importance industrielle cruciale. La troisième source de sucre est le maltose produit par la décomposition amylolytique de l'amidon (Evans 1990) (**Figure 20**).

Dans le pain sans sucres ajoutés (pâte ordinaire), les sucres libres préexistants fermentent complètement dans la première heure, ne laissant que le maltose d'amidon pour soutenir la fermentation (Oda *et al.*, 1990a ; Higgins *et al.*, 1999).



**Figure 20** : Représentation schématique des actions de dégradation et de fermentation des sucres (Roussel et Chiron, 2002).

#### III.3.2. Effet de la levure au cours de la panification

Dans la fabrication du pain à pâte droite, la levure est utilisée comme seul agent levant, tandis que dans la fabrication du pain au levain, un agent levant contenant à la fois



de la levure et des bactéries est utilisé pour faire lever la pâte et ajouter un étalage spécifique. (Delcour *et al.*, 2010), Le but principal de la levure (*Saccharomyces cerevisiae*) dans la fabrication du pain est de générer du dioxyde de carbone pour fermenter dans la pâte (Liao *et al.* 1998). Cependant, le rôle des souches de *Saccharomyces* en panification ne se limite pas à la production de gaz. La levure produit plusieurs métabolites qui peuvent affecter l'arôme et la saveur du pain (Cho *et al.*, 2010).

Une bonne levure boulangère est liée à une bonne fermentation du saccharose et du maltose, une adaptation rapide aux changements de substrats, une résistance au stress osmotique et surtout un fort potentiel fermentaire de la pâte (Benitez *et al.*,1996).

La pâte levée, contrairement à la pâte sans levure, devient plus sèche et plus rigide avec le temps de fermentation (Hoseney *et al.*,1979 ; Lio *et al.*,1998 ;Connelly *et al.*, 2008 ),le levage de la pâte dépend principalement de la production de gaz carbonique, qui est piégé dans la matrice de la pâte (Maloney *et al.*, 2003). Les bactéries principalement lactiques présentes dans les préparations de *Saccharomyces cerevisiae* et de pâte peuvent également jouer un rôle dans la fermentation de la pâte, car ils peuvent produire des acides organiques comme l'acide lactique (Viljoen *et al.*, 1993).



# CHAPITRE IV

## Synthèse des articles

Cette partie se focalise sur l'analyse générale et la synthèse de trois axes de recherches sous forme d'articles publiés en 2021, 2022, en faisant des liaisons avec la thématique du présent travail.

**1- ARTICLE : Comprendre les ingrédients du pain sans gluten pendant le chauffage par résistance électrique : fonction, effet et application possible pour la panification.**

Commençant par L'étude menée par Waziroh et al., (2022) visant à expliquer les différentes fonctions et applications des ingrédients du pain sans gluten (SG) pendant la panification et sous des conditions de chauffage par résistance électrique. Il a été mentionné que le gluten est essentiel dans la constitution d'un réseau protéique solide, il contribue à la viscoélasticité de la pâte. Son absence a un impact significatif sur les propriétés rhéologiques de la pâte. Waziroh et al. , Ont indiqué que la méthode principale pour traiter ce problème consiste à mélanger des ingrédients fonctionnels et additifs pour imiter partiellement les propriétés du pain de blé. De plus, l'optimisation des processus de cuisson pourra contribuer à améliorer la qualité du produit. De ce fait, les auteurs ont proposé l'utilisation du chauffage par résistance électrique, connu comme étant une technologie émergente transformant l'énergie électrique en énergie thermique, une alternative à la cuisson traditionnelle, relativement nouvelle et prometteuse à raison de son principe de chauffage volumétrique et uniforme. Ce qui améliorera le volume du pain, favorisant ainsi la qualité globale du pain SG.

Dans cette étude, La levure a été considérée parmi les ingrédients fonctionnels qui pourraient potentiellement favoriser le CO du pain SG. Elle présente une influence directe sur la conductivité alimentaire, ou en la favorisant indirectement par la production de métabolites spécifiques de levure (Ex. CO<sub>2</sub>). Par ailleurs, Johnson et Green ont étudié la conductivité des cellules de levure en suspension. Leurs travaux ont révélé que les conductivités des cellules de levure différaient. Ceci a été expliqué par le fait que les cellules de levures peuvent stocker des sels diffusibles dans leur corps. Pendant le processus de chauffage, des sels ont été libérés des cellules de levure, modifiant la résistance électrique des cellules ainsi que l'environnement de suspension. Une étude de Yoon et al., (2002) plus récente a présenté l'effet du chauffage par résistance électrique sur la structure et la perméabilité des membranes cellulaires de *S. cerevisiae*. Il a été démontré que pendant ce chauffage, les protéines intracellulaires étaient transloquées à l'extérieur de la membrane cellulaire au fur et à mesure que le champ électrique augmentait, en particulier à des températures plus élevées. Waziroh et al.,(2022) Ont constaté que le CO<sub>2</sub> est un facteur important à prendre en compte lors de la cuisson. La quantité et le taux de production de CO<sub>2</sub> ont un impact significatif sur la

conductivité de la pâte. Ces paramètres peuvent être contrôlés par le traitement et la formulation (par exemple, temps de fermentation, température, propriétés de levure et concentration) et peuvent être utilisés pour établir une plage d'aération pendant ce type de cuisson. Selon Birchet *al.*, (2013) La souche de levure reste un facteur critique qui affecte la fermentation, les souches pourraient conduire à différents temps de fermentation optimaux allant de 40 à 100 minutes. Selon Gally *et al.*(2017) la fermentation durant un chauffage par résistance électrique réduisait le temps de fermentation de 58 à 20 minutes.

En conséquence, les auteurs ont mentionné que n'y a pas assez d'informations pour confirmer si la levure de boulangère puisse avoir un impact significatif sur la conductivité électrique de la pâte étant la matrice alimentaire complexe SG. Dans un autre volet, les gaz tels que le CO<sub>2</sub> peuvent modifier considérablement les propriétés de la pâte SG, en particulier sa conductivité électrique. A cet effet, l'aération biologique de la pâte peut être contrôlée par plusieurs facteurs, dont les propriétés de la levure (type de souche et concentration) et les conditions de traitement (température et durée de la fermentation). Ces facteurs pourraient être utilisés comme outil dans d'autres études pour adapter l'aération de la pâte, qui conviendrait à une cuisson par résistance électrique.

## **2- Article : Fermentation de germes de blé avec *Saccharomyces cerevisiae* et *Lactobacillus plantarum* : optimisation du processus pour une composition et des propriétés antioxydantes améliorées in vitro.**

Dans un autre contexte, soulignant un sous-produit de la meunerie, le germe de blé, qui est un macronutriment, connu pour ces effets bénéfiques sur la santé, utilisés comme aliments fonctionnels, tels que les, caroténoïdes, thiamines, composés phénoliques, flavonoïdes, acide gamma-aminobutyrique (AGAB) et quinones. Sous-produit de la meunerie, est actuellement commercialisé principalement pour les applications d'alimentation animale et pour améliorer et augmenter les niveaux et les propriétés biologiques des composés bioactifs dans les céréales et les sous-produits des céréales. Cette étude menée par Bertsch Socorro *et al.*, (2021) vise à explorer et à optimiser le processus de fermentation du germe de blé pour obtenir des produits avec une composition nutritionnelle et des propriétés biologiques améliorées et à caractériser davantage les produits fermentés générés en utilisant ces conditions optimales. *Saccharomyces cerevisiae* 5022 (levure) et *Lactobacillus plantarum* souche 299v ont été utilisées sous des conditions de pH (4,5, 6 et 7,5) et de fermentation (24, 48 et 72 h) L'optimisation à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (MSR) visant à obtenir des produits fermentés à haute teneur en phénol total (TTP), en diméthoxybenzoquinone (DMBQ) et en activités antioxydantes.

Plusieurs études (Zhang *et al.*, 2015) ont montré que l'utilisation de levures ou de bactéries lactiques (LAB) pour la fermentation des céréales est une stratégie prometteuse avec plusieurs avantages. En parallèle, Les peptides peuvent également aider à améliorer les propriétés biologiques des grains fermentés.

L'étude démontre l'exploitation du processus de fermentation du germe de blé par ces microorganismes pour obtenir des produits avec un aspect nutritionnel et des propriétés biologiques améliorés, et à caractériser davantage les produits fermentés qui seront élaborés dans ces conditions optimales. En effet, la fermentation a été considérée comme une méthode efficace pour améliorer considérablement la teneur en polyphénols des produits résultants, il convient de mentionner que l'échantillon de germe de blé fermenté a montré une amélioration importante de sa teneur en phénol total par rapport à son homologue non fermenté. Ces résultats sont en accord avec le principe de subsidiarité qui a obtenu les teneurs phénoliques les plus élevées en germes de blé fermenté à l'aide de *Saccharomyces cerevisiae* après 48 h de fermentation (3,6 mg de AGE/g d'échantillon) qui ont diminué à 1,5 mg de AGE/g d'échantillon en augmentant le temps de fermentation. Le TTP du germe de blé à la suite d'une fermentation bactérienne au cours de 48 h était nettement supérieur à celui décrit pour la levure dans les conditions expérimentales. Les bactéries lactiques et *S. cerevisiae*, les deux souches utilisées dans la présente étude, contiennent un large éventail d'enzymes ;  $\beta$ glucosidase, carboxylase,  $\alpha$ -glucosidase et phosphokinase, capables de perturber la plupart des fibres présents dans les parois cellulaires du germe de blé. Ainsi, au cours du processus de fermentation, ces enzymes généreront une cassure de l'hepolyphénol-hémicellulose et de la substance qui, ultimement, peuvent provoquer des augmentations de TTP également appréciées dans cette étude. Le DMBQ est un dérivé des quinones qui contribuent grandement aux propriétés biologiques bénéfiques attribuées à la consommation de germe de blé. Dans l'ensemble, Le mécanisme de libération des hydroquinones (qui existent sous forme de  $\beta$ -glucosides) du germe de blé pendant la fermentation est attribué à l'action de la  $\beta$ -glucosidase libérée pendant les fermentations levurienne et bactériennes. Lorsque ces composés sont libérés par la rupture des liaisons  $\beta$ -glycosidiques, ils sont oxydés en DMBQ. En outre, dans le germe de blé, des niveaux élevés de  $\beta$ -glucosidase et les enzymes de la peroxydase peuvent être naturellement présentes, contribuant ainsi à la formation de DMBQ.

Au cours du processus d'optimisation, les activités antioxydantes ont été utilisées comme marqueur des propriétés biologiques *in vitro* du germe de blé fermenté. Les peptides bioactifs peuvent être produits par hydrolyse enzymatique pendant les processus de

fermentation, de germination et de maturation, et ils peuvent jouer un rôle actif en contribuant aux activités antioxydantes et antis carcinogènes du germe de blé.

Les résultats de cette étude ont conclu que la fermentation a entraîné une augmentation importante de ces composés bénéfiques. En conséquence, les produits fermentés peuvent avoir une valeur accrue lorsqu'ils sont vendus comme nutraceutiques ou aliments fonctionnels. Par ailleurs, la fermentation bactérienne du germe de blé à l'aide de *L. plantarum* était plus efficace que la fermentation à l'aide de *S. cerevisiae* pour la production de composés bioactifs et l'augmentation des activités biologiques in vitro du germe de blé fermenté.

### **3- Article : Ingénierie évolutive pour améliorer *Wickerhamomyces subpelliculosus* et *Kazachstania gamospora* pour la cuisson du pain.**

La dernière étude menée par les auteurs Semumu *et al.*, (2022) portée sur l'application de techniques d'ingénierie évolutive pour améliorer les souches de *Wickerhamomyces subpelliculosus* et *Kazachs taniagamo spora* et leurs implications dans la cuisson du pain, les auteurs ont mentionné qu'en dépit du monopole de la levure *Saccharomyces cerevisiae*. Cette dernière possède des inconvénients majeurs, tels que la baisse d'utilisation du substrat de carbone rationalisée et une faible capacité à résister à certain nombre de contraintes liées à la cuisson. D'où la nécessité selon ces auteurs de rechercher des levures alternatives au pain levain surtout que les modes de vie de consommation deviennent de plus en plus complexes.

Semumu *et al.*, ont examiné l'hypothèse de l'évolution adaptative de souches de levures de boulangerie. En effet, non seulement les souches ont évolué pour fermenter efficacement la source de carbone la plus abondante dans la farine conduisant à une vitesse élevée de levage, mais les souches ont également amélioré la capacité de résister au stress associé à la cuisson, ainsi que le volume de pain. Le recours à l'ingénierie évolutive pour améliorer les capacités de fermentation est bien décrit par (Kim *et al.*, 2013), mais pas dans le cas des levures non conventionnelles.

Les temps de fermentation relativement courts et la capacité de fermentation dans un court laps de temps présentent un intérêt commercial.

La capacité de lever de la pâte dépend de l'utilisation efficace des glucides, ce qui est très important pour une levure de boulangerie alternative (Randez-Gil *et al.*, 2003). Bien que le taux de fermentation de la pâte de farine par *S. cerevisiae* soit connu pour être le meilleur dans l'industrie de la boulangerie, les résultats présentés dans l'étude de Semumu *et al.* Suggèrent qu'il est possible de développer des souches de boulangerie alternatives avec des caractéristiques de cuisson comparables ou meilleures que celles de la levure de boulangerie

classique. La survie et la performance sous les stress associés à la cuisson est un autre attribut important de la levure de boulanger. La thermo tolérance est l'un des traits les plus pertinents car les levures sont soumises à un stress thermique pendant la préparation de la biomasse, le transport et la fermentation de la pâte (Panadero *et al.*, 2007). Également, les auteurs ont rapporté que l'ingénierie évolutive a pu améliorer la résistance aux températures plus élevées. Un autre stress important est le stress oxydatif, qui a un effet bien connu sur la rhéologie de la pâte pendant la fabrication du pain (Bonet *et al.*, 2006). Comme la plupart des systèmes biologiques de levure produisant de l'oxygène réactif pendant la croissance (Sies, 2014), une levure de remplacement devrait développer une résistance à ce stress. Les auteurs suggèrent que l'approche évolutive exploitée a conduit à une résistance accrue au stress oxydatif. En outre, les levures pendant la fermentation des sucres dans la pâte de farine produit de l'éthanol qui peut réduire les taux de croissance, la capacité de fermentation et la viabilité cellulaire (Nagodawithana *et al.*, 1976). Par le fait que la production d'éthanol contribue également à l'augmentation du taux de diffusion de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dans les cellules et augmente ainsi le stress oxydatif pendant la fermentation de la pâte (Banat *et al.* 1998).

L'évolution des levures pour s'adapter à une propriété cellulaire ou métabolique particulière peut entraîner une altération d'autres traits ou une perte de phénotype dans d'autres environnements, comme l'ont décrit abondamment Çakar *et al.* (2012) et Zeyl (2006).

En outre, le phénotype observé pourrait être lié à un certain nombre de mécanismes moléculaires, tels que l'insertion de gènes, la délétion de gènes, le dosage de gènes, les polymorphismes nucléotidiques uniques, les traits multigéniques, les variations structurelles à grande échelle des gènes et des voies d'utilisation du maltose, parmi de nombreuses alternatives examinées par Dragostis et Mattanovich (2013).

Cette étude a souligné que l'approche d'ingénierie évolutive conduit à une amélioration de l'apparence finale du pain comme une caractéristique importante dont dépend l'acceptabilité du pain. Le volume et la texture du pain sont les principaux attributs souhaitables. Bien qu'il existe de multiples stratégies pour développer des souches de levure vers des caractéristiques industrielles spécifiques, comme l'ont largement examiné Steensel *et al.* (2014a), l'ingénierie évolutive est l'une des plus simples, mais une approche très puissante pour développer des souches non recombinantes pour l'industrie de la boulangerie (Deckers *et al.*, 2020). Elle consiste à réaliser des expériences d'évolution mener par des passages en série de levure dans de la pâte de farine de blé, avec des modifications des préparations de pâte à

base de farine (temps de stérilisation plus court et température de stérilisation plus basse), des temps d'incubation plus longs et un nombre accru de cycles de passage.

En conclusion, les travaux de la présente étude ont mis en évidence que l'ingénierie évolutive reste un outil attrayant pour améliorer les performances de cuisson des levures non conventionnelles, ce qui a été une limitation majeure pour l'entrée sur le marché qui est monopolisé par *S. cerevisiae*. Cependant, d'autres études sont nécessaires pour révéler les mécanismes moléculaires à l'origine des améliorations observées.





# CONCLUSION

Au terme de ce travail et d'après la synthèse des différents thématiques proposées par les différents auteurs nous pouvons conclure que :

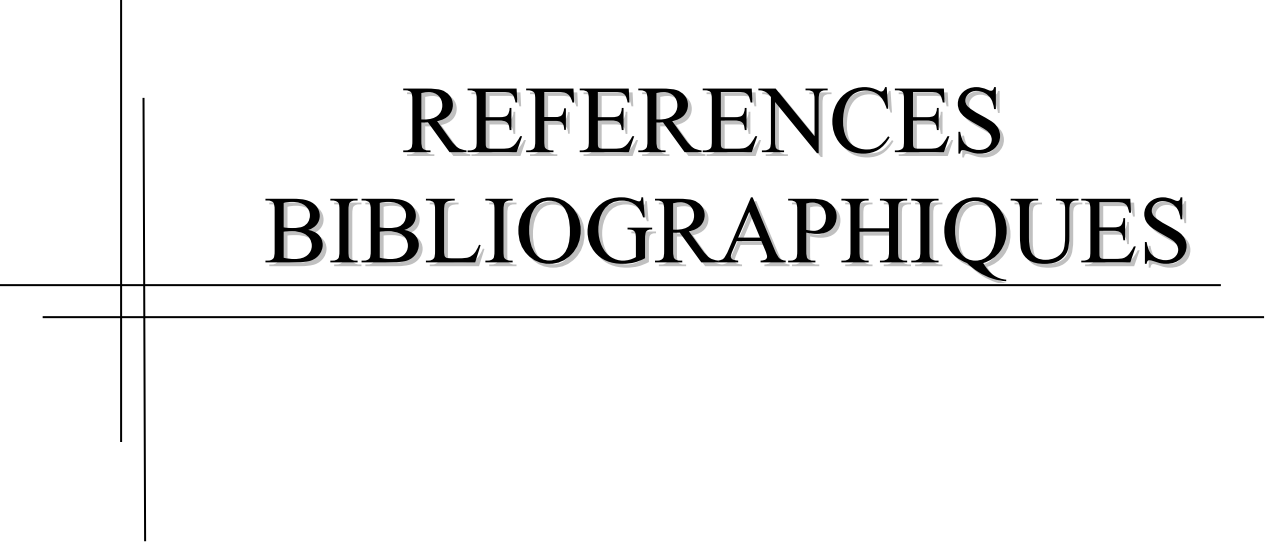
Premièrement, l'ingénierie évolutive a été définie comme un outil attractif pour améliorer les performances boulangères des levures non conventionnelles, ce qui a été un frein majeur à l'entrée sur le marché.

Tous les ingrédients individuels ainsi que leur interaction au sein de la pâte et le changement de leurs propriétés physiques pendant la phase de chauffage sont des facteurs qui nécessitent une attention particulière lors de la cuisson par résistance électrique.

La transformation des aliments en l'absence d'oxygène ou communément appelée fermentation nécessite l'utilisation de micro-organismes, parmi ces microorganismes la souche levurienne *Saccharomyces cerevisiae*, En raison de ses nombreuses et multiples tâches plus particulièrement panification a incité les chercheurs à explorer plus en profondeur les avantages, les inconvénients et les facteurs de qualité préférés pour un pain de bonne qualité.

Dans un autre volet la fermentation bactérienne du germe de blé à l'aide de *L. plantarum* était plus efficace que la fermentation de la levure à l'aide de *S. cerevisiae* pour la génération de composés bioactifs et l'augmentation des activités biologiques in vitro du germe de blé fermenté. De plus, le processus de fermentation utilisant *L. plantarum* a également été optimisé pour augmenter les composés bioactifs et les propriétés biologiques.

Enfin, la levure de boulanger classique *Saccharomyces cerevisiae* est considérée comme un ingrédient clé de la boulangerie avec trois fonctions : générer du dioxyde de carbone, faire mûrir la pâte et développer la saveur du pain et d'autres produits à base de farine, c'est la levure de choix et probablement la principale raison de son monopole millénaire, non seulement dans l'industrie de la boulangerie, mais aussi Inclut dans l'industrie du vin et de la bière.

A decorative graphic consisting of a vertical line on the left and a horizontal line below the text, intersecting to form a crosshair.

# REFERENCES

# BIBLIOGRAPHIQUES

- **Aa, E., Townsend, J. P., Adams, R. I., Nielsen, K. M., Taylor, J. W. (2006).** Population structure and gene evolution in *Saccharomyces cerevisiae*. *FEMS yeast research*, 6(5), 702-715.
- **Aidoo, K.E., Nout, M.J.R. (2010).** “Functionally yeasts and molds in fermented foods and beverages,” in *Fermented Foods and Beverages of the World*, eds J. P. Tamang and K. Kailas apathy (New York, NY: CRC Press, Taylor and Francis Group), 127–148. doi: 10.1201/ebk1420094954-c4.
- **Aldiguier, A. S., Alfenore, S., Cameleyre, X., Goma, G., Uribelarrea, J. L., Guillouet, S.E., Molina-Jouve, C. (2004).** Synergistic temperature and ethanol effect on *Saccharomyces cerevisiae* dynamic behavior in ethanol bio-fuel production. *Bioprocess and biosystems engineering*, 26(4), 217-222.
- **Aldiguier, A.-S. (2006).** Activité bio-catalytique en haute densité cellulaire de *Saccharomyces cerevisiae* pour l’intensification de la production en bioéthanol.
- **Allen, C., Büttner, S., Aragon, A. D., Thomas, J. A., Meirelles, O., Jaetao, J. E., ... & Werner-Washburne, M. (2006).** Isolation of quiescent and non quiescent cells from yeast stationary-phase cultures. *The Journal of cell biology*, 174(1), 89-100.
- **Alsammar, H. F., Naseeb, S., Brancia, L. B., Gilman, R. T., Wang, P. Delneri, D. (2019).** Targeted metagenomics approach to capture the biodiversity of *Saccharomyces* genus in wild environments. *Environmental Microbiology Reports*, 11(2), 206-214
- **Amillastre, E. (2012).** Amélioration de la robustesse de souches de levures aux stress technologiques par une stratégie de génie microbiologique : Application à la production industrielle de bioéthanol à partir de matières premières agricoles (Doctoral dissertation, Toulouse, INSA).
- **Attfield, P. V. (1997).** Stress tolerance: the key to effective strains of industrial baker’s
- **Boudalia, S., Boudebouz, A., Gueroui, Y., Bousbia, A., Benada, M., Leksir, C., Boukaabene, Z., Saihi, A., Touaimia, H., Ait-Kaddour, A., 2020.** Characterization of traditional Algerian cheese “Bouhezza” prepared with raw cow, goat and sheep milks. *Food Science and Technology*.
- **Beney, L., Gervais, P. (2001).** Influence of the fluidity of the membrane on the response of microorganisms to environmental stresses. *Applied microbiology and biotechnology*, 57(1), 34-42.
- **Benitez, T., Gasent –Ramirez, J.M., Castrejon, F., Codon, A.C. (1996).** Development of new

- strains for the food industry-Biotechnology Progress ,12(2) ,149-163 .
- **Bertsch Socorro, A. (2021).** Fermentation de coproduits de l'industrie laitière et céréalière par *Lactobacillus rhamnosus* et *Saccharomyces cerevisiae*.
  - **Birch AN, Petersen MA, Arneborg N, Hansen ÅS (2013)**Influence of commercial baker's yeasts on breadaromaprofiles. *Food Res Int* 52(1):160–166.
  - **Botstein, D.,Fink, G. R. (2011).** Yeast: an experimentalorganism for 21st Century biology. *Genetics*, 189(3), 695-704.
  - **Boulemkahel, S. (2014).** Panification sans gluten à base de riz et féverole : effet améliorant d'une adjonction combinée HPMC-Xanthane. *Magister en Sciences Alimentaires, Université Constantine-1, Algérie.*
  - **Bourdichon, F., Casaregola, S., Farrokh, C., Frisvad, J. C., Gerds, M. L., Hammes, W. P., et al. (2012).** Food fermentations: microorganismswithtechnologicalbeneficial use. *Int. J. Food Microbial.* 154, 87–97. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.12.030.
  - **BRANGER A., RICHER M.M. et ROUSTEL S. 2007.** Microchimie et alimentation. Edit Educagri, Paris, pp 173-180.
  - **Brugal, G. (1988).** La cytométrie en flux pour l' étude de la cellule normale ou pathologique, edited by P. Métézeau, X. Ronot, G. Le Noan-Merdrignac, and MH Ratinaud. MEDSI/McGraw-Hill, Paris, 1988, 407 pages, \$64.50.
  - **Buche, F. (2011).** Influence de la formulation de pâtes de farine de blé sur leur consommation d'oxygène et leur production de dioxyde de carbone au cours du pétrissage et de la fermentation: Conséquences biochimiques et rhéologiques (Doctoral dissertation, AgroParisTech).
  - **Calvel, R., (1990).** Le gout du pain : comment le préserver, comment le retrouver.Éditions Jérôme Villette, ISBN 2 - 86547 - 016 - 4.
  - **Campbell N.A. et Reece J.B., 2004,** Biologie, Edition du Renouveau Pédagogique inc., p.168-181
  - **Castan, C. (2016).** La levure de bière : un champignon aux multiples bienfaits pour la santé etla beauté (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MONTPELLIER).
  - **CAUVAIN S.P. (2007) –** Breadmaking processes, in S. P. Cauvain et L. S. Young dir, *Technology of breadmaking*, Springer, p.21-50.
  - **Celhay, F., 2000.** Mesure en continu de paramètres rhéologiques, de la consommation

- d'oxygène et de la production de dioxyde de carbone au cours du pétrissage de pâtes boulangères. Influence de l'addition de substrats rédox et d'oxydoréductases exogènes. Mémoire d'ingénieur, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris. Pp 138
- **Celton, M. (2011).** Etude de la réponse de *Saccharomyces cerevisiae* à une perturbation NADPH par une approche de biologie des systèmes (Doctoral dissertation, Montpellier, SupAgro).
  - **CHARGELEGUE A., GUINET R., NEYRENEUF O., ONNO B. et POITRENAUD B. 1994.** La fermentation, "La panification française". GUINET R. et GODON B. Edit Tec et Doc, Lavoisier, Paris, pp 283-325, 468 p.
  - **Chen, B., Wu, Q., and Xu, Y. (2014).** Filamentous fungal diversity and community structure associated with the solid-state fermentation of Chinese Maotai-flavor liquor. *Int. J. Food Microbiol.* 179, 80–84. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2014.03.011.
  - **Cho, I.H., Peterson, D.G. (2010).** Chemistry of bread aroma: A review. *Food science and Biotechnology*, 19(3), 575-582.
  - **Ciafardini, G., Marsilio, A., Lanza, B., and Pozzi, N. (1994).** Hydrolysis of oleuropein by *Lactobacillus plantarum* strains associated with olive fermentation. *Appl. Environ. Microbiol.* 60, 4142–4147.
  - **Cipollina C., Ten Pierick A., Canelas A. B., Seifar R. M., van Maris A. J. A., van Dam J. C. et Heijnen J. J., 2009,** A comprehensive method for the quantification of the non-oxidative pentose phosphate pathway intermediates in *Saccharomyces cerevisiae* by GC-IDMS, *Journal of Chromatography B* 877, p. 3231-3236
  - **Connelly, R.K., McIntier, R.L. (2008).** Rheological properties of yeasted and non yeasted wheat doughs developed under different mixing conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(13), 2309-2323.
  - **Corsetti, A., Perpetuini, G., Schirone, M., Tofalo, R., Suzzi, G. (2012).** Application of starter cultures to table olive fermentation: an overview on the experimental studies. *Frontiers in Microbiology*, 3, 248.
  - **D'Amore, T., and Stewart, G. G. (1987).** Ethanol tolerance of yeast. *Enzyme and Microbial Technology*, 9(6), 322-330.
  - **De Deken, R. H. (1966).** The Crabtree effect: a regulatory system in yeast. *Microbiology*, 44(2), 149-156.
  - **De Vuyst, L., Neysens, P. (2005).** The sourdough micro flora: biodiversity and metabolic

- interactions. *Trends in Food Science & Technology*, 16(1-3), 43-56.
- **DE VUYST, L.; GÄNZLE, M.** Second international symposium on sourdough: from fundamentals to applications. *Trends Food Sci. Tech.*, v.16, n.1, p.2-3, 2005.
  - **Delcour J.A, Hosney, R.C. (2010).** Principals of cerealscience and thecnology (vol .3). St. Paul, MN, USA :AACC International, Inc.
  - **Drapron R., Potus J., Laplume F., Potus, P. 1999.** Notre pain quotidien. Edition AGP, Paris.
  - **Dunn, B., Richter, C., Kvittek, D. J., Pugh, T., Sherlock, G. (2012).** Analysis of the
  - **Ehsani, M., Fernández, M. R., Biosca, J. A., Dequin, S. (2009).** Reversal of coenzyme specificity of 2,3-butanediol dehydrogenase from *Saccharomyces cerevisiae* and in vivo functional analysis. *Biotechnology and Bioengineering*, 104(2), 381–389.
  - **Evans, I.H. (1990)** Yeast strains for baking: recent developments. In *Yeast Technology* ed.
  - Fagarasanu, A., Rachubinski, R. A. (2007). Orchestrating organelle inheritance in *Saccharomyces cerevisiae*. *Current opinion in microbiology*, 10(6), 528-538.
  - **Fay, J. C., Benavides, J. A. (2005).** Evidence for domesticated and wild populations of *Saccharomyces cerevisiae*. *PLoS genetics*, 1(1), e5.
  - **Ferreira, F. (1997).** *Saccharomyces cerevisiae* : importance dans le développement des sociétés humaines. Rôle dans l'industrie agro-alimentaire et en thérapeutique. Thèse : Pharmacie : Paris XI : 1997. 119 p
  - **Fintan Walton, E., Pringle, J. R. (1980).** Effect of growth temperature upon heat sensitivity in *Saccharomyces cerevisiae*. *Archives of Microbiology*, 124(2), 285-287.
  - **Fritsche, W. (1972).** AH Rose and JS Harrison (Editors), the Yeasts, Vol. 2. *Physiology and Biochemistry of Yeasts*. XIV+ 571 S., 73 Abb., 39 Tab. London-New York 1971: Academic Press.
  - **Gally T, Rouaud O, Jury V, Havet M, Ogé A, Le-Bail A (2017)** Proofing of bread dough assisted by ohmic heating. *Innov Food Sci Emerg Technol* 39:55–62.
  - **Gally, T. (2017).** Etudes expérimentales et numériques du procédé de chauffage ohmique appliqué à la panification (Doctoral dissertation, Nantes, Ecole nationale vétérinaire).
  - **Garcia, R. 2000.** Etude de trois systèmes enzymatiques d'oxydoréduction - catalase, peroxydase et glucose oxydase - pris isolément et en mélange, susceptibles d'intervenir en

technologie de la panification. Thèse de Biochimie, Option Sciences alimentaires, Université Paris 7.

- **Gervais, P., de Marañon, I. M. (1995).**Effect of the kinetics of temperature variation on *Saccharomyces cerevisiae* viability and permeability. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1235(1), 52-56.
- **Gest, H. 2004.** « The Discovery of Microorganisms by Robert Hooke and Antoni van Leeuwenhoek, Fellows of The Royal Society ». *Notes and Records of the Royal Society* 58 (2): 187-201. doi:10.1098/rsnr.2004.0055.
- **Genot C, Eymard S, Viau M. 2004.** Comment protéger les acides gras polyinsaturés à longues chaînes oméga 3 (AGPI -- LC  $\omega$ 3) vis-à-vis de l'oxydation ? *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*. Volume 11, Numéro 2, 133-141.
- **Giannou, V., Kessoglou, V., Tzia, C. (2003).** Quality and safety characteristics of bread made from frozen dough. *Trends in Food Science & Technology*, 14(3), 99-108.
- **GODON B. (1981)** – Le pain, Pour la Science Paris, 250, p.p. 74-87.
- **Goulet, O. (2009).** Un probiotique pas comme les autres : d'une histoire tropicale à des propriétés biologiques et des effets cliniques prouvés. *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*, 6(22), 269-272.
- **Gray, J. V., Petsko, G. A., Johnston, G. C., Ringe, D., Singer, R. A., & Werner-Washburne, M. (2004).**“Sleeping beauty”: quiescence in *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology and molecular biology reviews*, 68(2), 187-206.
- **Gray, W. D., Sova, C. (1969).** Effect of alcohol on yeast hexokinase. *Mycopathologia et mycologia applicata*, 37(1), 70-76.
- **Guinet R, Godon B.** La panification Française. Cachan : Tec & Doc Lavoisier, 1994, 521p.
- **Guyot, S., Ferret, E., Gervais, P. (2005).** Responses of *Saccharomyces cerevisiae* to thermal stress. *Biotechnology and bioengineering*, 92(4), 403-409.
- **Hammes, W. P. (1990).** Bacterial starter cultures in food production. *Food Biotechnol.* 4, 383–397.
- **Hansen, E.C., 1883.** Undersogelser over alkoholgjaersvampenes fysiologi og morfologi. 11. Om askosporedannelsen hos slægten *Saccharomyces*. *Medd. Carlsberg Lab.* 2, 29 - 86.
- **HARRISON J. S. et A. H. ROSE (1970).** Introduction in *Yeast Technology*. In: *The Yeast* 3. Eds A. Rose and J. S. Harrison. Academic Press, London and New York. pp 1-4.



- **Hartwell, L. H. (1974).** *Saccharomyces cerevisiae* cell cycle. *Bacteriological reviews*, 38(2), 164-198
- **Hasan, M.N.; Sultan, M.Z.; Mar-E-Um, M.** Significance of fermented food in nutrition and food science. *J. Sci. Res.* 2014, 6, 373–386.(fermentation-06)
- **Hencke, S. (2000).** Utilisation alimentaire des levures (Doctoral dissertation, UHP-Université Henri Poincaré).
- **Higgins, V.J., Braidwood, M., Bell, P., Bissinger, P., Dawes, I.W. and Attfield, P.V. (1999)** Genetic evidence that high non-induced maltase and maltose permease activities, governed by MALx3 encoded transcriptional regulators determine efficiency of gas production by baker's yeast in unsugared dough. *Applied and Environmental Microbiology* 65, 680–685.
- **Hoseney, R.C, Hsu, K.H, Junge, R.C. (1979)** Simple spread test to measure the rheological properties of fermenting dough. *Cereal Chemistry*, 56(3), 141-143.
- **HP Fleming, RF McFeeters, MA Daeshel, EG Humphries, RL Thompson.** Fermentation of cucumbers in anaerobic tanks. *J Food Sci* 53:127–133, 1988.
- **Ibáñez, C., Pérez-Torrado, R., Chiva, R., Guillamón, J. M., Barrio, E., Querol, A. (2014).** Comparative genomic analysis of *Saccharomyces cerevisiae* yeasts isolated from fermentations of traditional beverages unveils different adaptive strategies. *International journal of food microbiology*, 171, 129-135.  
Interactions entre *Torulaporadelfrueckii* et *Saccharomyces cerevisiae* en cultures mixtes (Doctoral dissertation).
- **International Olive Oil Council (IOOC). (2004).** Trade Standard Applying to Table Olives. IOOC
- **Jacobson, J. L. (2006).** Introduction to Wine Laboratory - Practices and Procedures. Springer Science.
- **Jacques, K. A., Lyons, T. P., Kelsall, D. R. (2003).** *The Alcohol Textbook* 4th Edition (4th ed.).
- **Jeffries, T. W., and Jin, Y. S. (2000).** Ethanol and thermotolerance in the bioconversion of xylose by yeasts.
- **Jespersen, L. (2003).** Occurrence and taxonomic characteristics of strains of *Saccharomyces cerevisiae* predominant in African indigenous fermented foods and beverages. *FEMS yeast research*, 3(2), 191-200.

- **Jiranek, V., Langridge, P., & Henschke, P. A. (1995).** Amino acid and ammonium utilization by *Saccharomyces cerevisiae* wine yeasts from a chemically defined medium. *American Journal of Enology and Viticulture*, 46(1), 75–83.
- **JL Etchells, HP Fleming, LH Hontz, TA Bell, RJ Monroe.** Factors influencing bloater formation in brined cucumbers during controlled fermentation. *J Food Sci* 40:569–575, 1975. (prof)4
- **JM Jay.** *Modern Food Microbiology*. 5th ed. New York: Chapman and Hall, 1996, pp. 163–1645.
- **Käppeli, O. (1986).** Regulation of carbon metabolism in *Saccharomyces cerevisiae* and related yeasts. *Advances in microbial physiology*, 28, 181-209.
- **Käppeli, O., Sonnleitner, B., Blanch, H. W. (1986).** Regulation of sugar metabolism in *Saccharomyces*-type yeast: experimental and conceptual considerations. *Critical Reviews in Biotechnology*, 4(3), 299-325.
- **Kelly, A. L., Huppertz, T., and Sheehan, J. J. (2008).** Pre-treatment of cheese milk: principles and developments. *Dairy Sci. Technol.* 88, 549–572. doi: 10.1051/dst:2008017.
- **Kiers, J. L., Van laeken, A. E. A., Rombouts, F. M., and Nout, M. J. R. (2000).** In vitro digestibility of *Bacillus* fermented soya bean. *Int. J. Food Microbiol.* 60, 163–169. doi: 10.1016/S0168-1605(00)00308-1.
- **Knop, M. (2006).** Evolution of the hemiascomycete yeasts: on life styles and the importance of inbreeding. *Bioessays*, 28(7), 696-708.
- **Knop, M. (2011).** Yeast cell morphology and sexual reproduction—A short overview and some considerations. *Comptes rendus biologies*, 334(8-9), 599-606
- **Kondrashov, A. S., Crow, J. F. (1991).** Haploidy or diploidy: which is better?. *Nature*, 351(6324), 314-315.
- **Kreger-van Rij, N. J. W. (1969).** Taxonomy and systematics of yeasts. *The yeasts*, 1, 5-78.
- **Kubo, Y., Rooney, A. P., Tsukakoshi, Y., Nakagawa, R., Hasegawa, H., and Kimura, K. (2011).** Phylogenetic analysis of *Bacillus subtilis* strains applicable to natto (fermented soybean) production. *Appl. Environ. Microbiol.* 77, 6463–6469. doi: 10.1128/AEM.00448-11.
- **Kurtzman, C. P., Fell, J. W., & Boekhout, T. (Eds.). (2011).** *the yeasts: a taxonomic study*. Elsevier.

- **Lai, Q. P. (2010).** Utilisation de levures non *Saccharomyces* en œnologie.
- **LANDGRAF, F. (2002).** Produits et procédés de panification. Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire, 3(F6180), F6180-1.
- **Laranjo, M., Potes, M. E., Elias, M. (2019).** Role of starter cultures on the safety of fermented meat products. *Frontiers in Microbiology*, 10, 853.
- **Larpent, J. P., Larpent-Gourgaud, M. (1997).** Mémento Technique de Microbiologie (3<sup>édn</sup>). Lavoisier : Londres, New York, Paris.
- **Larpent, J.-P. (1990).** Biotechnologie des levures. Elsevier Masson.
- **Leão, C., Van Uden, N. (1985).** Effects of ethanol and other alkanols on the temperature relations of glucose transport and fermentation in *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied microbiology and biotechnology*, 22(5), 359-363.
- **Lee, J. H., Williamson, D., amp; Rogers, P. L. (1980).** The effect of temperature on the kinetics of ethanol production by *Saccharomyces uvarum*. *Biotechnology Letters*, 2(4), 141-146.
- **Lee, K. J., Skotnicki, M. L., Tribe, D. E., Rogers, P. L. (1981).** The effect of temperature on the kinetics of ethanol production by strains of *Zymomonas mobilis*. *Biotechnology Letters*, 3(6), 291-296.
- **Lefebvre, T. (1991).** Le Dr Doyen, sa Staphylase et sa Mycolysine. *Revue d'histoire de la pharmacie*, 79(289), 193-198.
- **LEVAVASSEUR L. 2007.** Suivi simultané de la consommation d'oxygène et de la consistance des pâtes de farine de blé à l'aide d'un pétrin instrumenté (le sitoxygraphe) : tentative d'explication biochimique et rhéologique. Application à l'ajout de laccases. Thèse de doctorat .Agro. Paris Tech, France, 415 p.
- **Leveau, J. Y., Bouix, M. (1993).** Microbiologie industrielle : les micro-organismes d'intérêt industriel.
- **Li, K. Y. (2004).** Fermentation: Principles and microorganisms. *FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-MARCEL DEKKER-*, 155-168.
- **Liao, Y.E, Miller, R.A. Hoseney, R.C (1998).** Role of hydrogen peroxide produced by baker's yeast on dough rheology –cereal chemistry ,75(5), 612-616.
- **Ly, X.-C., Huang, X.-L., Zhang, W., Rao, P.-F., Ni, L. (2013).** Yeast diversity of traditional alcohol fermentation starters for Hong Qu glutinous rice wine brewing, revealed by culture-dependent and culture-independent methods. *Food Control* 34, 183–190. doi:

10.1016/j.foodcont.2013.04.020.

- **MA Daescnel, HP Fleming, RF McFeeters.** Mixed culture fermentation of cucumberjuicewith *Lactobacillus plantarum* and yeasts. *J Food Sci* 53:862–864, 1988
- **Macara, I. G., Mili, S. (2008).** Polarity and differential inheritance—universal attributes of life?. *Cell*, 135(5), 801-812.
- **MacArthur, L.A., D'apponia, B.L. (1979).** Comparison of oat and wheat carbohydrates. *Cereal Chemistry*, 56(5), 455-457.
- **Maggiar A.** La levure de bière. Escalquens : Dangles, 2014, 80 p.
- **Maloney, D.H., Foy, J.J. (2003).** Yeast fermentation. In K. Kulp and K. Lorenz (Eds.), *Handbook of dough fermentation* (pp. 57-108). New York : Marcel Dekker.
- **Marañón, I. M., Chaudanson, N., Joly, N., Gervais, P. (1999).** Slow heat rate increases yeast thermotolerance by maintaining plasma membrane integrity. *Biotechnology and bioengineering*, 65(2), 176-181
- **Michael Breitenbach, J. D. B., Stanley Brul, Ian W. Dawes, J. Richard Dickinson, Piet deGroot, Gino Heeren, Klaas Hellingwerf (2004).** "The Metabolism and Molecular Physiology of *Saccharomyces cerevisiae*." CRC Press Second edition (Edited by J. Richard Dickinson and Michael Schweizer).
- **Mitchison, J. M. 1971.** The biology of the cell cycle. Cambridge University Press, London .
- **Mondal, A., Datta, A. K. (2008).** Bread baking—A review. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 465-474.
- **MONTEL M.C., BERANGER C. et BONNEMAIRE J. 2005.** Les fermentations au service des produits de terroir. Edit INRA, pp 151 – 154, 320 p
- **Mucchetti, G., Bonvini, B., Remagni, M. C., Ghiglietti, R., Locci, F., Barzaghi, S., et al. (2008).** Influence of cheese-making technology on composition and microbiological characteristics of Vastedd cheese. *Food Control* 19, 119–125. doi: 10.1016/j.foodcont.2007.02.011.
- **Müller, V. (2001).** Bacterial fermentation. *Evolution and nature of mutations during budding yeast evolution.* *Current Biology*, 16(16), 1581-1590
- **Nagodawithana, T.W. Trivedi, N. (1990)** Yeast selection for baking. In *Yeast Strain Selection*. Panchal, C.J. pp. 139±184. New York: Marcel Dekker.
- **Nevoigt, E., Stahl, U. (1997).** Osmoregulation and glycerol metabolism in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *FEMS Microbiology Reviews* .

- **Ndangui, C. B. (2015).** Production et caractérisation de farine de patate douce (Ipomoea batatas, Lam): optimisation de la technologie de panification (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- **Nguyen, T. D. (2016).** Protection de la levure *Saccharomyces cerevisiae* par un système biopolymérique multicouche : effet sur son activité métabolique en réponse aux conditions de l'environnement (Doctoral dissertation, Université de Bourgogne).
- **Nkhata, S. G., Ayua, E., Kamau, E. H., Shingiro, J. B. (2018).** Fermentation and germination improve nutritional value of cereals and legumes through activation of endogenous enzymes. *Food science & nutrition*, 6(8), 2446-2458.
- **Nout, M. J. R., Aidoo, K. E. (2002).** "Asian fungal fermented food," in *The Mycota*, ed H. D. Osiewacz (New York, NY: Springer-Verlag), 23–47. doi: 10.1007/978-3-662-10378-4\_2.
- **Oda, Y. Ouchi, K. (1990a3)** Role of yeast maltose fermentation genes in CO<sub>2</sub> production rate from spongedough. *Food Microbiology* 7, 43±47.
- **Oguntoyinbo, F. A., Sanni Abiodun, I. S., Franz, C. M. A. P., and Holzapfel, W. H. (2007).** In vitro fermentation studies for selection and evaluation of *Bacillus* strains as starter cultures for the production of okpehe, a traditional African fermented condiment. *Int. J. Food Microbiol.* 113, 208–218. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2006.07.006.
- **ONNO, B., RAGOT, L. (1988).** Elaboration d'un levain naturel. Aspects microbiologiques. *Industries des céréales*, (54), 17-21.
- **Parkouda, C., Nielsen, D. S., Azokpota, P., Ouoba, L. I. I., Amoa-Awua, W. K., Thorsen, L., et al. (2009).** The microbiology of alkaline-fermentation of indigenous seeds used as food condiments in Africa and Asia. *Critical Rev. Microbiol.* 35, 139–156. doi: 10.1080/10408410902793056.
- **Parry, J. M., Sharp, D., Tippins, R. S., Parry, E. M. (1979).** Radiation-induced mitotic and meiotic aneuploidy in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 61(1), 37-55.
- **Poitrenaud, B. (2003).** Lesaffre International, Marcq-en-Baroeul, France. *Handbook of Dough Fermentations*, 127, 197.
- **Potus, J., Amrani, F. E., Ameille, V., & Kaid, N. (1996).** Les hydrolases en panification. *Industries des Céréales*, 7-12.
- **Raj, T., Chandrasekhar, K., Kumar, A. N., Kim, S. H. (2021).** Recent biotechnological

- trends in lacticacidbacterial fermentation for foodprocessing industries. *SystemsMicrobiology and Biomanufacturing*, 1-27.
- **Rastoin, J. L. (2008).** Les multinationales dans le système alimentaire. *Revue projet*, (6), 61-69.
  - **REVY, R. (2005).** Levures biologiques alimentaires et poudres levantes. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire*, 3(F4600).
  - **Rezac, S., Kok, C. R., Heermann, M., Hutkins, R. (2018).** Fermented foods as a dietary source of live organisms. *Frontiers in microbiology*, 9, 1785.
  - **Ribéreau-Gayon, P. (1991).** Le vin (Vol. 2606). Presses Universitaires de France-PUF.
  - **Ribéreau-Gayon, P., Dubourdieu, D., Donèche, B., amp; Lonvaud, A. (Eds.).(2006).** Handbook of enology, Volume 1 : The microbiology of wine and vinifications (Vol. 1). John Wiley & Sons.
  - **Riess, J. (2012).** Intensification de la brique «fermentation alcoolique» de substrats betteraviers pour la production d'éthanol (Doctoral dissertation).
  - **ROUSSEL P. et CHIRON H. 2003.** Les pains français, évolution, qualité et production. Edit MAE-ERTI, France, 293 p.
  - **Roussel, P. et Chiron, H., 2002.** Les pains français - Evolution, qualité, production. MAEERTI. Vesoul, Science et Technologie des métiers de bouche.433.
  - **Roussel, P., Chiron, H., Paillard, G. (2002).** Les pains français: évolution, qualité, production. Maé-Erti.
  - **Roussel, P., Onno, B., Michel, E., & Sicard, D. (2020).** *La panification au levain naturel* (p. 100). éditions Quae.

- **Rupeš, I. (2002).** Checking cell size in yeast. *TRENDS in Genetics*, 18(9), 479-485.
- **Russell, I. (2003).** Understanding yeast fundamentals. *The alcohol textbook*, 4, 531-537.  
*Saccharomyces cerevisiae* in anaerobic glucose-limited chemostat cultures. *Microbiology*, 136(3), 395-403.  
*Saccharomyces cerevisiae* pan-genome reveals a pool of copy number variants distributed in diverse yeast strains from differing industrial environments. *Genome research*, 22(5), 908 -924.
- **Salma, M. (2013).** Etude et caractérisation de l' état " Viable mais Non Cultivable "chez *Saccharomyces cerevisiae*. Thèse. 'Université de Bourgogne - Institut Jules Guyot - Institut Universitaire de la Vigne et du Vin UMR PAM A02-102 Equipe VAlMiS.
- **Salmon, J. M., Fornairon, C., amp; Barre, P. (1998).** Determination of oxygen utilization pathways in an industrial strain of *Saccharomyces cerevisiae* during enological fermentation. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 86(2), 154-163.
- **SC Prescott, CG Dune. Industrial Microbiology. New York; McGraw-Hill, 1982,** pp. 185–236.
- **Sablani, S. S., Marcotte, M., Baik, O. D., & Castaigne, F. (1998).** Modeling of simultaneous heat and water transport in the baking process. *LWT-Food Science and Technology*, 31(3), 201-209.
- **Scanlon, M. G., & Zghal, M. C. (2001).** Bread properties and crumb structure. *Food research international*, 34(10), 841-864.
- **Sharma, R., Garg, P., Kumar, P., Bhatia, SK et Kulshrestha, S. (2020).** La fermentation microbienne et son rôle dans l'amélioration de la qualité des aliments fermentés. *Fermentation*, 6 (4), 106.
- **Sicard, D., Legras, J. L. (2011).** Bread, beer and wine: yeast domestication in the *Saccharomyces sensu stricto* complex. *Comptes rendus biologies*, 334(3), 229-236 .
- **Spencer, J.T.F. and Spencer, D.M. pp. 14±54. Heidelberg: Springer Verlag.**  
**Stiles, M. E., Holzapfel, W. H. (1997).** Lactic acid bacteria of foods and their current taxonomy. *Int. J. Food Microbiol.* 36, 1–29. doi: 10.1016/S01681605(96)01233-0.
- **Swiegers, J. H., Bartowsky, E. J., Henschke, P. A., Pretorius, I. (2005).** Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavour. *Australian Journal of grape and*

wineresearch, 11(2),139-173.

- **Tamang, J. P. (2010b)**. Diversity of fermented foods, In: Tamang JP, Kailasapathy, K. (Eds.) *Fermented Foods and Beverages of the World*, CRC Press, Taylor and Francis Group, New York, 41–84. doi: 10.1201/ebk1420094954-c2.
- **Tamang, J. P., Fleet, G. H. (2009)**. “Yeasts diversity in fermented foods and beverages,” in *Yeasts Biotechnology: Diversity and Applications*, eds T. Satyanarayana, and G. Kunze, (New York, NY: Springer), 169–198. doi: 10.1007/978-1-4020-8292-4\_9.
- **THERDTHAI N. (2014)** – Fermentation, in Z. Weibiaodir, *Bakery products science and technology*, second edition, Wiley-Blackwell, p.325-334.
- **Thompson, D. A., Desai, M. M., Murray, A. W. (2006)**. Ploidy controls the success of
- **Thuriaux P.** *Les organismes modèles, la levure*. Paris : Belin, 2004, 282 p.
- **Tomita, S., Nakamura, T., and Okada, S. (2018)**. NMR- and GC/MS-based metabolomics characterization of sunki, an unsalted fermented pickle of turnip leaves. *Food Chem.* 258, 25–34. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.03.038.
- **Triptolème, 2014**. Glossaire de descripteurs en panification, (consultation le 20/03/2020).
- **Urien, C. (2015)**. Diversité des espèces de levures dans des levains naturels français produits à partir de farine issue de l'Agriculture Biologique : une étude pilote pour analyser les pratiques boulangères et les patterns des communautés microbiennes (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).
- **Valence-Bertel, F., Thierry, A. (2019, June)**. La fermentation de matières premières végétales. In *CTCPA: Journée produits végétaux fermentés non pasteurisés* (p. np).
- **Verduyn, C., Zomerdijk, T. P., van Dijken, J. P., Scheffers, W. A. (1984)**. Continuous measurement of ethanol production by aerobic yeast suspensions with an enzyme electrode. *Applied microbiology and biotechnology*, 19(3), 181-185.
- **Verduyn, C., Postma, E., Scheffers, W. A., van Dijken, J. P. (1990)**. Physiology of
- **Viljoen, B. C., Lues, J. F. R. (1993)**. The microbial population associated with post-fermented dough and compressed bakers. *Yeast .Food Microbiology*, 10(5), 379-386.
- **Walter P. Hammes, James Harnett, et al. 2012**. « Food fermentations: Microorganisms with technological beneficial use ». *International Journal of Food Microbiology* 154 (3): 87-97. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2011.12.030.
- **Watanabe, K., Fujimoto, J., Sasamoto, M., Dugersuren, J., Tumursuh, T., and Demberel, S. (2008)**. Diversity of lactic acid bacteria and yeasts in airag and tarag,



traditional fermented milk products from Mongolia. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 24, 1313–1325. doi: 10.1007/s11274-007-9604-3.

- **Watson, K. (1987)**, "Temperature relations," in "The Yeast. Vol. 2: Yeasts and the Environment," Academic Press Inc; 2nd Revised edition, A. H. Rose and J. S. Harrison.
- **Werner-Washburne, M., E. Braun, et al. (1993)**. "Stationary phase in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*." *Microbiological Reviews* 57(2): 383-401.
- **Wiggins, C., & Cauvain, S. P. (2007)**. Proving, baking and cooling. In *Technology of breadmaking* (pp. 141-173). Springer, Boston, MA.
- **Williams, T., Pullen, G. (2007)**. Functional ingredients. In *Technology of breadmaking* (pp. 51-91). Springer, Boston, yeast. *Nature biotechnology*, 15(13), 1351-1357.
- **Yoon, S. W., Lee, C. Y. J., Kim, K. M., Lee, C. H. (2002)**. Leakage of cellular materials from *Saccharomyces cerevisiae* by ohmic heating. *Journal of microbiology and biotechnology*, 12(2), 183-188.
- **Zhang, J.-y.; Xiao, X.; Dong, Y.; Wu, J.; Yao, F.; Zhou, X.-H.** Effect of fermented wheat germ extract with *Lactobacillus plantarum* D-1 on HT-29 cell proliferation and apoptosis. *J. Agric. Food Chem.* 2015, 63, 2449–2457
- **Zheng, X. C., Ge, Z., Lin, K., Zhang, D., Chen, Y., Xiao, J., et al. (2021)**. Dynamic changes in bacterial microbiota succession and flavor development during milk fermentation of Kazak artisanal cheese. *Int. Dairy J.* 113:104878. doi: 10.1016/j.idairyj.2020.104878.
- **Zheng, X., Shi, X., Wang, B. (2021)**. A Review on the general cheese processing technology, flavor biochemical pathways and the influence of yeasts in cheese. *Frontiers in Microbiology*, 2186.