

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Bejaia



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Sciences Alimentaires
Filière : Sciences Alimentaires

Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle en vue de l'obtention du diplôme
de **MASTER**

Option : Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire

Thème

**SUIVI DE LA FERMENTATION ET
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES AU COURS DE
LA PRODUCTION DE LA BIÈRE « ALBRAÛ »**

Réalisé par :

CIZA Pascaline et BIBOLO John

Soutenu le : 26/06/2023

Devant le jury composé de :

Mme Oukil Naima

Présidente

Mme Idres Nacera

Promotrice

Mme Merzouk Hafida

Examinatrice

Année universitaire : 2022 / 2023

Remerciements

Nous rendons d'abord grâce à Dieu, le Tout puissant, pour nous avoir donné la force, le courage, la volonté, l'amour du savoir et surtout la patience pour pouvoir réaliser ce travail.

Nous avons le plaisir de trouver ici l'occasion d'exprimer notre sincère gratitude à tous ceux qui ont concouru à la réalisation de ce mémoire.

*Nous tenons particulièrement à remercier notre promotrice, **Mme Imadalou-Idres Nacera**, pour avoir accepté la charge d'être rapporteur de ce mémoire. Nous la remercions pour sa disponibilité, ses pertinents conseils et pour les efforts qu'elle a consenti durant la réalisation de ce mémoire.*

Qu'elle trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

*Nous tenons à adresser nos respectueuses reconnaissances et nos chaleureux remerciements à **Mr. Idir Azzedine**, responsable du service laboratoire de la Brasserie Star d'Algérie qui a bien voulu encadrer l'étude sur terrain.*

A travers ses qualités professionnelles, en tant qu'encadreur, il nous a transmis de précieuses connaissances ainsi qu'une rigueur scientifique qui nous seront très utiles dans notre avenir professionnel.

Nous tenons également à le remercier pour sa générosité au nom du savoir et sa modestie au profit de l'étudiant, pour son soutien, ses conseils et ses encouragements ainsi que pour la très grande patience dont il a fait preuve à notre égard. Nous sommes aussi très reconnaissants pour les discussions que nous avons pu avoir, qui ont toujours été une source d'information, et ont beaucoup contribué à nous faire avancer dans nos réflexions

Nos remerciements s'étendent également à l'ensemble de l'équipe de laboratoire pour leur contribution et leur soutien.

A tous les membres du Jury, Merci d'avoir accepté de juger ce travail et d'avoir apporté votre contribution scientifique.

Nous adressons, enfin et surtout, nos plus profondes gratitudee et tout notre amour à nos familles respectives qui ont su nous faire confiance et nous soutenir en toute circonstances ainsi qu'à tous nos proches amis qui nous ont toujours soutenu et encouragé même dans les périodes les plus difficiles

Grand merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce Mémoire de fin d'étude.

**** Merci ****

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

A mes très chers parents à qui je dois le mérite d'en arriver là. Un grand et tout particulier « merci », de m'avoir transmis de vraies valeurs et pour votre inépuisable affection, votre soutien inconditionnel, votre sacrifice et votre amour infini. Que le Tout Puissant vous garde en bonne santé.

A mes frères et sœurs pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral

A la mémoire de ma petite sœur Annette, que Dieu l'accueille dans son vaste paradis

A mon fiancé GIHORO pour son amour, sa patience, son soutien et ses encouragements ;

A mon oncle L. Gn. Godefroid pour tous ses encouragements et son soutien inconditionnel ;

A ma Tante Adeline qui est une maman pour moi ;

A mon collègue dans ce travail et mon ami John BIBOLO ;

Tous mes amis en souvenir de plus beaux instants qu'on a passé ensemble ;

Et enfin, à toutes les personnes qui comptent pour moi, qui ont intervenu dans ma vie et qui m'ont accompagné et soutenu ;

A tous qui, par un mot ou un acte, m'ont donné la force de continuer.

Que Dieu vous bénisse avec une belle et longue vie

Pascaline.

Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers

A mon cher père

Rien ni aucune dédicace ne saurait exprimer mon admiration, mon respect, mon amour et ma considération pour tous les efforts et sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour vos conseils avisés, le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance, et j'espère que votre m'accompagnera pour l'éternité.

A ma chère mère,

Rien ne saurait exprimer l'amour que je ressens pour vous. Sans vous, je ne serai pas là où j'en suis aujourd'hui. Vous m'avez toujours soutenu et accompagné pour l'accomplissement de mes rêves.

Je vous remercie pour l'éducation que vous m'avez offerte, le soutien et l'amour que vous me portez depuis le bas âge.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables prières et sacrifices. Puisse Dieu vous bénir et vous garder longtemps

A mes adorables frères et sœurs

Je vous remercie énormément pour votre soutien, vos souhaits et prières de me voir avancer et réussir dans ce que j'entreprends. Merci pour l'amour que me démontrez tous les jours. Ma vie ne serait pas si intéressante sans vous.

Je vous aime

John

TABLE DES MATIERES

Liste des figures

Liste des tableaux

Sigles et abréviations

Introduction.....1

PARTIE THEORIQUE

Chapitre I. Présentation de l'organisme d'accueil

I.1. Historique.....3

I.2. Gamme des produits.....3

I.3. Organigramme.....4

Chapitre II. Bière et matières premières

II.1. La bière.....5

II.1.1. Définition.....5

II.1.2. Historique.....5

II.1.3. Types de bières.....7

II.2. Les matières premières.....7

II.2.1. L'orge.....7

II.2.2. L'eau.....9

II.2.3. Le houblon.....9

II.2.4. La levure.....11

1. Les caractéristiques de la levure brassicole.....11

2. Les besoins nutritionnels de la levure.....12

II.2.5. Les produits d'ajout13

Chapitre III. Processus de fabrication de la bière

III.1. Traitement de l'eau.....14

a. Les principaux critères d'une eau de brassage.....14

b. Les sels minéraux les plus influents.....15

III.2. Les étapes de fabrication de la bière.....	17
III.2.1. Le maltage.....	17
III.2.2. Le concassage.....	19
III.2.4. Le brassage.....	20
III.2.4. La fermentation.....	24
1. La fermentation primaire.....	24
a. Métabolisme de la levure.....	25
b. La glycolyse.....	26
c. Devenir du pyruvate.....	27
2. La fermentation secondaire.....	27
3. Les métabolites secondaires et la production d'arômes.....	28
III.2.5. La filtration.....	29
III.2.6. Le conditionnement.....	30

PARTIE PRATIQUE

Chapitre IV. Matériels et Méthodes

IV.1. Méthodes d'analyse.....	32
1. Potentiel d'hydrogène (pH).....	32
2. Mesure de la turbidité.....	33
3. Mesure de la densité.....	34
4. Mesure de la couleur.....	36
5. Comptage cellulaire et taux de mortalité.....	37
6. Dosage du diacétyle.....	38
7. Dosage d'amertume.....	40
8. Dosage des polyphénols totaux.....	40
9. Dosage du taux d'alcool.....	41
10. Température et pression.....	42
11. Contrôle de saturation en CO ₂	42
12. Contrôle de l'oxygène dissout.....	44
13. Dosage des calciums.....	45

Chapitre V. Résultats et discussions

V.1. Cinétique de fermentation.....	46
V.2. Evolution du taux de CO ₂ dissous, du taux d'Alcool et du pH.....	48
V.2.1. Evolution du taux de CO ₂ dissous.....	49
V.2.2. Evolution du taux d'alcool.....	49
V.2.3. Evolution du pH.....	50
V.3. Evolution de la densité du moût et des teneurs en polyphénols totaux et en calcium.....	51
V.3.1. Evolution de la densité du moût.....	52
V.3.2. Evolution de la teneur en polyphénols totaux.....	52
V.3.3. Evolution de la teneur en calcium.....	53
V.4. Détermination de quelques paramètres liés à la production de la bière au cours de la fermentation.....	54
V.4.1. Evolution du diacétyle et de la turbidité.....	54
1. Evolution du diacétyle.....	54
2. Evolution de la turbidité.....	55
V.4.2. Evolution de l'amertume et de la couleur.....	56
1. Evolution de l'amertume.....	57
2. Evolution de la couleur.....	57
V.4.3. Evolution du taux d'oxygène dissous.....	58
V.5. Température et Pression.....	59

Conclusion

Références bibliographiques

Annexes

Liste des figures

Figure 1 : Organigramme de l'entreprise.....	4
Figure 2 : Les grains d'orge.....	8
Figure 3 : Section longitudinale d'un grain d'orge.....	8
Figure 4 : Cônes du Houblon.....	10
Figure 5 : Pellets du Houblon.....	10
Figure 6 : Levure au microscope.....	13
Figure 7 : le malt concassé	20
Figure 8 : Schéma général de la glycolyse.....	26
Figure 9 : biochimie de la formation de l'Alcool.....	27
Figure 10 : Exemple de voies de synthèse impliquées dans la formation de composés organoleptiques chez <i>S. cerevisiae</i> et ayant une importance (positive ou négative) dans les boissons fermentées.....	29
Figure 11: Diagramme de la fabrication de la bière.....	31
Figure 12 : pH-mètre.....	33
Figure 13 : Turbidimètre Vos-Rosta (Haffmans).....	34
Figure 14 : Densimètre/ Saccharimètre (Aréomètre).....	36
Figure 15 : Spectrophotomètre UV-Visible.....	37
Figure 16 : Lame de Malassez.....	38
Figure 17 : Microscope optique.....	38
Figure 18 : Alcoomètre FermentoFlash.....	42
Figure 19 : Testeur de pureté de CO ₂ type CCT.....	43
Figure 20 : CO ₂ / O ₂ mètre (CO ₂ -mètre/ Oxymètre).....	44
Figure 21 : Courbe de croissance de la levure et ln x en fonction du temps.....	46
Figure 22 : Comparaison de la croissance de la levure à l'évolution du CO ₂ , d'alcool et du pH.....	48
Figure 23 : Evolution de la densité et des teneurs en polyphénols et en calcium	51
Figure 24 : Evolution du diacétyle et de la turbidité.....	54
Figure 25 : Evolution de l'amertume et de la couleur.....	56

Figure 26 : Evolution de l'oxygène dissous.....	58
Figure 27 : Température et pression.....	59
Figure 28 : Cycle de Krebs	
Figure 29 : Métabolisme de la levure et formation du diacétyl	
Figure 30 : Diagramme de conditionnement	

Liste des tableaux :

Tableau I : Gamme des produits finis.....	3
Tableau II : Types de bières.....	7
Tableau III : Composition chimique de l'orge.....	9
Tableau IV : Composition chimique du houblon séché.....	10
Tableau V : Les principaux types de levures brassicoles.....	11
Tableau VI : Variation des propriétés de la bière en fonction des palliers de température.....	21
Tableau VII : Composition du moût de 12° Plato.....	23
Tableau VIII : Résultats de contrôle des paramètres physico-chimique au cours de la fermentation	

Sigles et abréviations

BSA : Brasserie Star d'Algérie

SPA : Société Par Action

% : Pourcentage

°C : Degré Celsius

°P : Degré Plato

Ca : Calcium

Cm : Centimètre

CO₂: Dioxyde de carbone

O₂ : Oxygène

CO₃²⁻ : Carbonate

AgNO₃ : Nitrate d'argent

°f : Degré français

EBC : European Brewery Convention

EDTA : Acide éthylène dinitro tétra acétique

CMC : Carboxy méthyl cellulose

H₂SO₄ : Acide sulfurique

HCl : Acide chlorhydrique

hl : Hectolitre

K₂CrO₄ : Chromate de Potassium

KOH : Hydroxyde de potassium

L : Litre

ml : Millilitre

mg : Milligramme

g : Gramme

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

pH : Potentiel hydrogène

ppm : Partie par million

UA : Unité d'amertume

CCT : Tank Cyllindro-Conique

α : Alpha

β : Beta

UV : Ultra-violet



Introduction

INTRODUCTION GENERALE

La notion de la fermentation existait depuis des millénaires avant Jésus-Christ, sans que l'homme n'ait la connaissance du processus biologique précis. Plusieurs controverses autour de la fermentation ont partagé les savants du 18^{ème} siècle. Certains chimistes et naturalistes, comme Pierre Joseph Macquer qui considéra la fermentation comme un mécanisme de décomposition de la matière, incapable d'organiser des véritables formes vivantes (Charbonnat, 2009). D'autres philosophes et matérialistes, comme Diderot à la fin du 18^{ème} siècle utilisent la notion de fermentation pour expliquer la notion des êtres vivants sans recourir à une cause première, et emploient pour la première fois l'expression de génération spontanée (Charbonnat, 2009). Un siècle plus tard, Louis Pasteur, considéré comme le père de la microbiologie définit la fermentation comme une vie en absence de l'air.

De nos jours, la fermentation est utilisée dans nombreux procédés industriels, elle permet la transformation de la matière organique par des microorganismes (ferments) qui conduit à la modification du substrat. Les ferments utilisés sont de trois types ; les bactéries, les moisissures et les levures, ils possèdent des capacités fermentaires menant à différents produits : Acide lactique, éthanol, acide acétique, acide propionique..... Ces fermentations interviennent dans plusieurs domaines, tels que les industries, alimentaire, pharmaceutique, cosmétique et aussi dans le domaine des hydrocarbures.

Dans l'industrie de la bière, la fermentation est le procédé par lequel les sucres fermentescibles du moût sont transformés en alcool, CO₂ et de l'énergie, sous l'action des levures, il s'agit de la fermentation alcoolique. Charles Cogniard de la tour avait rapporté en 1838 que la levure était responsable de la fermentation alcoolique (Lodolo *et al.*, 2008). La fermentation alcoolique intervient également dans la fabrication d'autres produits tels que le pain, les gâteaux traditionnels à pâtes levées, le levain et les arômes. Elle contribue autant dans de nombreux procédés techniques aboutissant à la production des biocarburants, des désinfectants etc.

La fermentation alcoolique est le cœur de la production brassicole ainsi que le théâtre de plusieurs réactions enzymatiques (glycolyse, décarboxylation du pyruvate, cycle de Krebs, chaîne respiratoire), permettant à la levure d'acquérir l'énergie nécessaire pour sa respiration, la synthèse

du stérol dont le rôle est de la protéger face à l'éthanol. L'ensemble des réactions enzymatiques lui procure aussi la faculté d'être prête à la transformation des sucres fermentescibles, à une vitesse exponentielle en présence d'oxygène et décroît en son absence. C'est au cours de cette étape de production que se forme la bière, avec une saturation en dioxyde de carbone, se clarifie et atteint son affinage organoleptique (maturation).

La bière est populaire dans le monde entier et elle est considérée comme la boisson alcoolisée la plus ancienne et la plus consommée au monde (Duran-Sanchez *et al*, 2022). La consommation de la bière dans le monde atteint les 177 milliards de litres chaque année soit plus de 5600 litres chaque seconde. La République tchèque affiche la plus forte consommation par tête, avec plus de 150 L par an, suivie par l'Autriche, la Pologne et l'Allemagne avec plus de 100 L/tête/an (Salanta *et al.*, 2020). La bière présente l'avantage d'être bénéfique pour la santé humaine en améliorant la digestion. Elle favorise la prévention des maladies cardiovasculaires, des maladies osseuses à l'instar de l'ostéoporose. Récemment, des études ont montré qu'une consommation modérée de bière peut avoir des propriétés anti-inflammatoires et antioxydantes, elle présente certains avantages pour la densité osseuse et peut également prévenir les maladies coronariennes (Salanta *et al.*, 2020 et Kang Q *et al*, 2023).

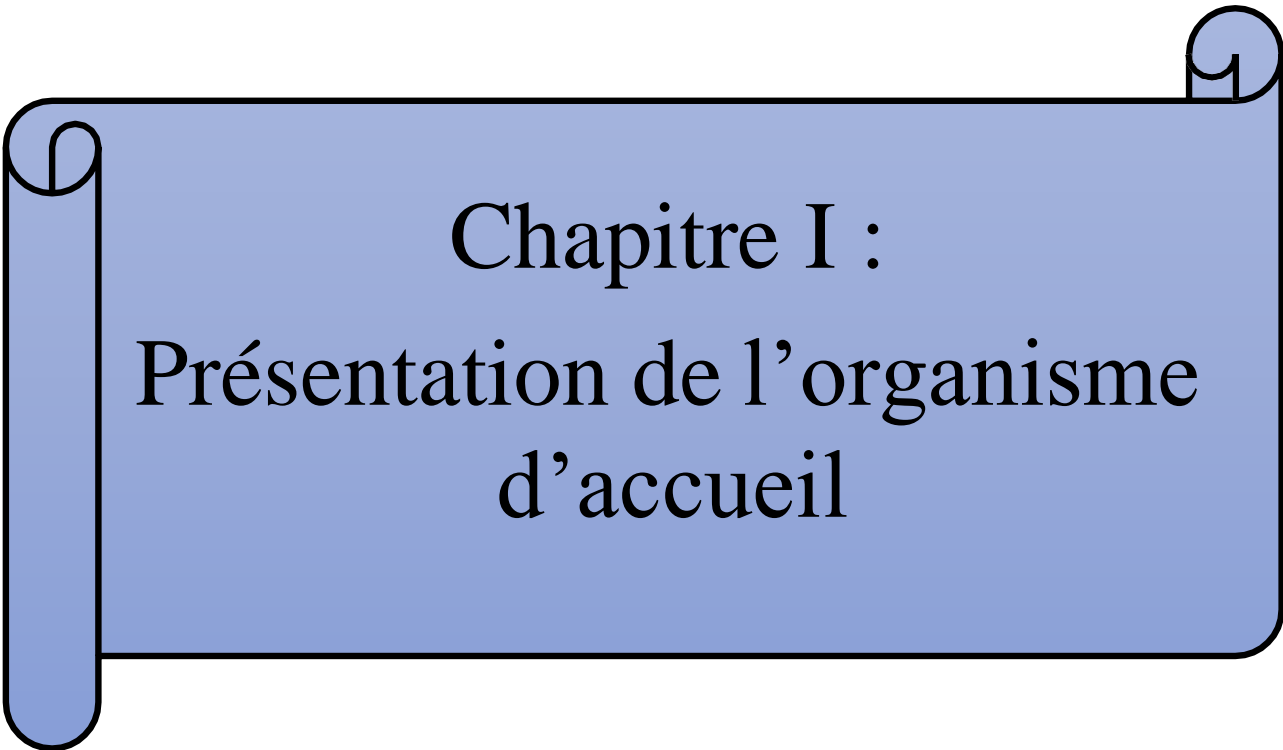
Dans le souci d'obtenir une bière saine et nutritive répondant aux besoins des consommateurs et respectant les exigences établies par les organismes de normalisation, notre travail au sein du laboratoire contrôle qualité de la Brasserie star d'Algérie s'est basée sur le suivi de la fermentation et des paramètres physico-chimiques au cours de la production de la bière. Notre travail a pour but de contrôler la fermentation ainsi que d'attester la qualité et la conformité de la bière produite.

Une première partie relative à la synthèse bibliographique, nous l'avons abordée avec des généralités sur les matières premières utilisées et les process de fabrication de la bière.

Une deuxième partie expérimentale portant sur le matériel et méthodes, les résultats obtenus ainsi que leurs, exploitation et discussion.



Partie
théorique



Chapitre I :
Présentation de l'organisme
d'accueil

I.1. Historique

L'entreprise SPA Brasserie star Algérie est une unité spécialisée dans la production des boissons alcoolisées. Son siège social est situé dans la commune d'El-kseur wilaya de Bejaia sous l'adresse de BP 374 zone industriel d'El-kseur 06003 Bejaia. Elle est soumise au régime juridique du secteur privé.

SPA Brasserie Star Algérie a été créée le 12 février 2005 suite à une signature de contrat de partenariat entre le groupe industriel AKMOUSSI et leurs partenaires UNIBRA du Belgique. A cette époque, elle a été nommée Brasserie Skol d'Algérie. C'est à partir du 30 mars 2005 qu'elle a commencé officiellement son activité et elle a commercialisé son premier produit en Avril 2007.

L'entreprise est devenue 100% Algérienne à partir du 12 février 2008 après que les belges ont vendu tous leurs actions au groupe industriel AKMOUSSI et sa nomination est alors devenu Brasserie Star d'Algérie. La marque du produit est appelée ALBRAÛ qui signifie :

AL : Algérie BRA : Brasserie U : Unibra

I.2. Gamme de produits

Tableau I : Gamme de produits de la Brasserie Star d'Algérie

Type de produits	Formats
Bière « Albrau »	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bouteille de 24cl ▪ Bouteille de 25cl ▪ Canette de 50cl ▪ Canette de 33cl
Bière « Koelberg »	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bouteille de 25cl ▪ Canette de 50cl ▪ Canette de 33cl
Jus « Malte d'orge »	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bouteille de 25cl

I.3. Organigramme de l'entreprise

L'entreprise est constituée de plusieurs départements et chacun d'eux comporte plusieurs services.

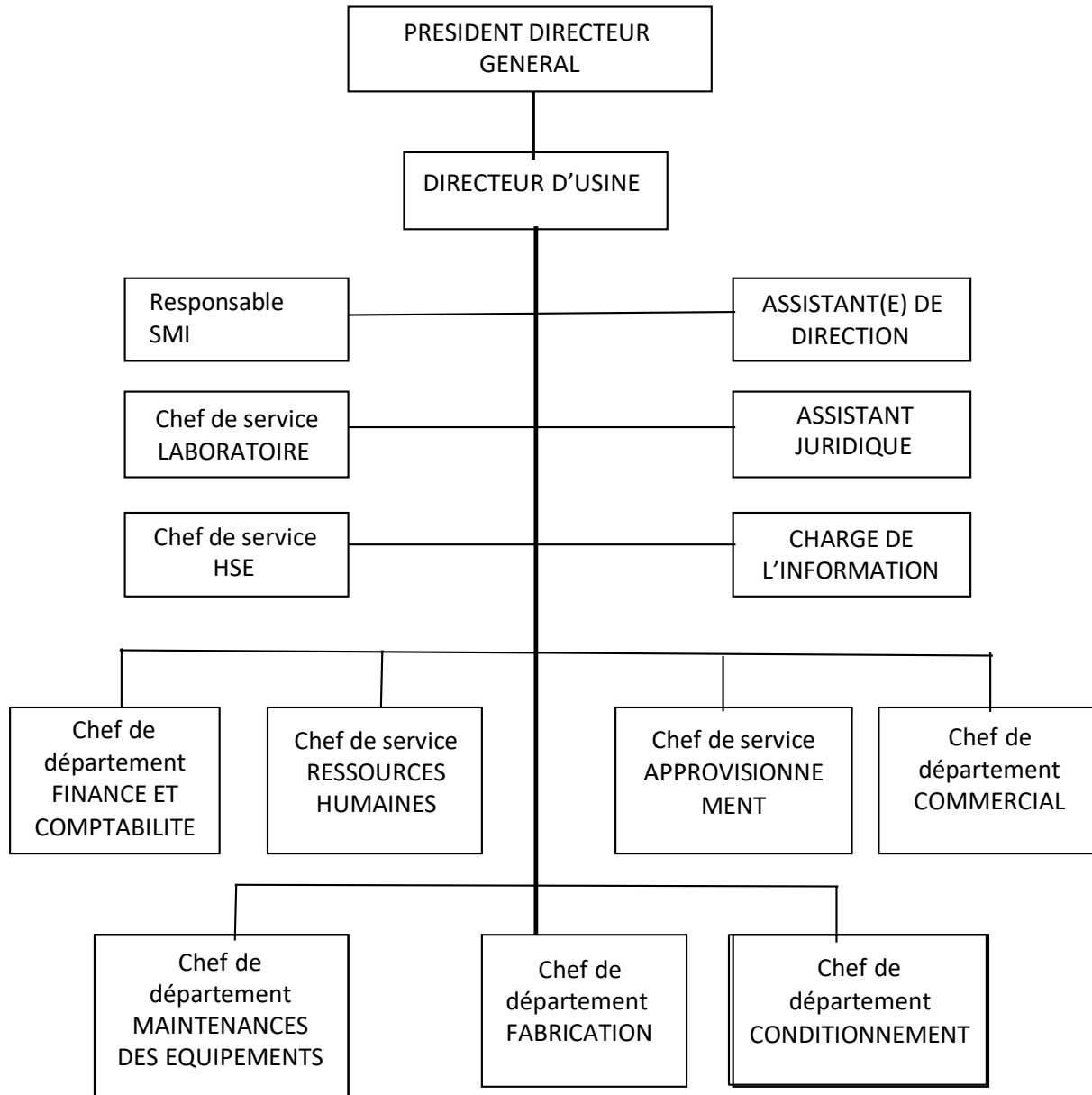


Figure 2 : Organigramme de l'entreprise



Chapitre II :
Bière et matières premières

II. 1. La bière

II. 1. 1. Définition

Le décret du 31 Mars 1992 définit la bière comme étant une boisson obtenue par fermentation alcoolique d'un moût préparé à partir de céréales, de matières premières issues de céréales, de sucres alimentaire et de houblon, de substances conférant de l'amertume provenant du houblon et d'eau.

L'école supérieur de brasserie de Nancy (France) donne une définition plus détaillée : « La bière est le produit de la fermentation du moût de bière, liquide sucré qu'on obtient en faisant macérer dans l'eau et à température convenable, de la farine de malt (ou orge germé) en faisant bouillir ce liquide avec du houblon. La fermentation de ce moût de bière est provoquée par addition d'un levain constitué par un organisme vivant microscopique appelé levure de bière. »

II.1.2. Historique

La bière est sans doute le breuvage le plus ancien jamais fabriqué par l'Homme. Celle-ci reste la boisson alcoolisée la plus vendue au monde.

Sa découverte est encore un mystère à l'heure actuelle. D'après la légende, une récolte d'orge destinée au pain dévastée par la pluie, aurait germé. Exposée au soleil, puis contaminée par de levures présentes naturellement dans l'environnement : la bière était née.

Sa création remontrait à 10 000 ans avant J.C avec les Mésopotamiens et les Sumériens. La première trace écrite est une tablette trouvée en 1981 décrivant une sorte de bière préparée par les babyloniens 6 000 ans avant J.C. Ces civilisations vénéraient alors Ninkasi, déesse sumérienne de la bière.

C'est en Europe de l'Ouest que la bière va se développer le plus, notamment en Allemagne, en Belgique et en France. Ces pays ont été les premiers à utiliser le houblon comme aromate.

Au X^e siècle, des corporations de brasseurs voient le jour, créant ainsi une profession à part entière. L'utilisation du houblon ne se répandit qu'à partir du XV^e siècle et devança très vite les autres plantes amères qui aromatisaient à l'époque la bière (gentiane, coriandre, absinthe, sauge ou lavande).

En ce qui concerne la fabrication, c'est au XIX^e siècle que s'opère un réel changement dans le processus de création notamment du fait des évolutions technologiques (refroidissement, verrerie, filtration, embouteillage, ...)

A la même époque, les recherches scientifiques sur les microorganismes vont permettre de mieux comprendre et maîtriser le processus de la fermentation alcoolique, d'améliorer les conditions sanitaires des brasseries et de produire une boisson plus saine et plus claire.

De nos jours, la fabrication de la bière est presque automatisée dans la plupart de ses étapes de fabrication. En plus, on constate deux tendances au niveau de la production brassicole : au niveau mondial, des fusions importantes entre grands groupes brassicoles ; au niveau régional, la renaissance de petites et moyennes brasseries qui développent des produits variés et de qualité liés au terroir.

II.1.3. Les types de bières

Tableau II : les types de bières

Classification	Types de bières	Caractéristiques	Exemples
Fermentation	Fermentation haute	Température de travail des levures : 15 à 26°C Période de fermentation : 3 à 8 jours	Ales
	Fermentation basse	Température de travail des levures : 5 à 11°C Période de fermentation : 7 à 10 jours	Lager
	Fermentation spontanée	N'exige aucune addition de levure. Le moût placé à l'air libre dans des cuves peu profonds, reçoit des levures naturellement présentes dans l'air environnant	Gueuze Kriek Lambic
	Fermentation mixte	Combinaison de fermentation haute et la fermentation spontanée	
Couleur	Bières blondes	Couleur dorée ; limpide et brillante. Brassée avec des malts blonds pâles.	Pils
	Bières brunes	Couleur acajou à noir ébène ; Brassée avec des malts bruns fortement torréfiés	
	Bières blanches	Couleur blonde pâle naturellement trouble. Riche en saveurs d'agrumes	
Degré d'alcool	Bière de table	2 à 3% vol	Bock
	Bières de luxe	4,4 à 5,4% vol	Quilme
	Bière spéciale	Plus de 5,5% vol	Ambrée
	Bière sans alcool	0 à 1,2% vol	Sans alcool

II. 2. Les matières premières

Les principales matières premières dans la fabrication de la bière sont : l'orge sous forme germé (le malt), le houblon, l'eau et la levure.

II.2.1 L'orge

L'orge est la céréale le plus utilisé dans la fabrication de la bière. Les céréales contiennent 70 à 80% d'amidon et une petite quantité de sucres simples, c'est cette source d'énergie qui est à la base du corps de la bière et qui permet d'obtenir un produit nutritif et alcoolisé.

L'orge est réputée pour favoriser une bonne digestion et pour son apport en fibres, vitamines B, Sélénium, phosphore, fer, cuivre et magnésium. Elle contient huit acides aminés essentiels et a une action favorable sur le taux de sucre dans le sang, le cholestérol et la flore intestinale. L'orge n'est pas utilisée de suite pour fabriquer la bière, mais elle est d'abord transformée en malt après une phase de germination et séchage. La sélection de l'orge est très rigoureuse et le malteur doit tenir compte de la taille du grain, du degré d'humidité ou encore de la teneur en protéines.

On distingue 2 grandes espèces d'orge de brassage : l'orge d'hiver (escourgeon) et l'orge de printemps. L'orge de printemps a 2 rangs et est privilégiée (le nom provient du nombre de rangs dans chaque épi) par rapport à l'orge d'hiver à 6 rangs, car sa teneur en protéines est plus faible et l'usage en brasserie est donc plus propice car on aura une bière moins trouble.



Figure 2 : Les grains de l'orge

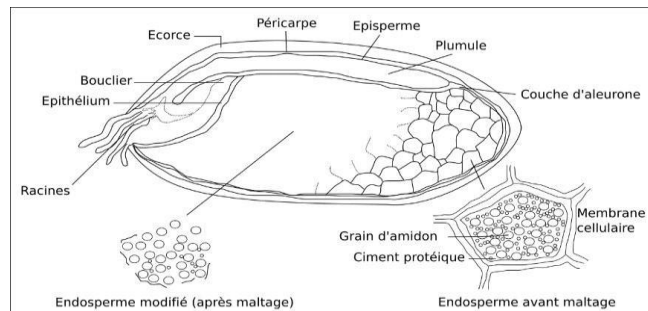


Figure 3 : Section longitudinale d'un grain d'orge

▪ Composition chimique d'un grain d'orge

La composition chimique de l'orge est incontestablement la mieux équilibrée pour les besoins du brasseur ; c'est de toutes les céréales, celle qui répondent le mieux aux conditions techniques de la fabrication.

Tableau III : La composition chimique de l'orge

Eau	12 à 17%
Hydrates de carbone	62 à 74%
Matières grasses	1 à 3%
Matières azotées	9 à 12%
Minérales	2 à 3%
Amidon	44 à 58%
Cellulose et hémicellulose	4 à 10%
Matières non azotées	3 à 4%
Matières peptiques, pentosanes, gommés	7 à 11%
Sucres	1 à 1.5%

II.2.2. L'eau

L'eau est essentielle dans la fabrication de la bière. Une bière contient généralement plus de 90% d'eau et un litre de bière fabriqué consomme 7 à 10 litres d'eau.

L'eau est donc indispensable en tant qu'eau de process et également eau de nettoyage. Les exigences de qualité de l'eau des brasseries dépassent en règle générale celles applicables à l'eau du robinet. L'eau doit être fraîche, pauvre en calcaire et présenter des propriétés bactériologiques et physico-chimiques irréprochables (Schweiber, 2017).

II.2.3. Le houblon

Le houblon, *Humulus Lupulus* (nom latin), est une plante grimpante de la famille des cannabinaées. Cette liane herbacée vivace à rhizome peut atteindre 8 mètre de hauteur et produire chaque année de juin à septembre, des cônes ovoïdes très odorants et couverts d'une résine jaunâtre odorante et pulvérulente, la lupuline.

Le houblon commença à être utilisé dans le brassage de la bière à partir du VIII^e siècle en Europe centrale et fût vite adopté par le monde brassicole car il permet de compenser la saveur

sucrée du malt et d'ajouter de l'arôme et de l'amertume tout en apportant son pouvoir antiseptique. Le houblon a aussi un avantage d'être un conservateur naturel ce qui permet un stockage de la bière à plus long terme.

La lupuline contient deux acides alpha : l'humulone et la lupulone. L'humulone se transforme ensuite en isohumulone au cours de la cuisson qui est un antibactérien à la saveur amère. La lupulone quant à elle, est un antibactérien et un antioxydant. Ces deux composés contribuent à la conservation de la bière.

Il existe plusieurs variétés de houblon : les houblons aromatisants utilisés pour leur arôme, les houblons amérisants pour leur goût amer et les houblons équilibrés à la fois aromatisant et amérisants. Le brasseur utilise le houblon comme aromate, soit à l'ébullition des moûts pour en extraire l'amertume aromatique, soit à froid en caves de garde pour parfumer la bière.



Figure 4 : Cônes du houblon



Figure 5 : Pellets de houblon

Le **tableau IV** ci-dessous représente la composition chimique du houblon séché :

Composant	Pourcentage (%)
Humidité	10 à 11
Acide Alpha	2 à 12
Acide Bêta	2 à 10
Huiles essentielles	0,5 à 2
Polyphénols	2 à 5
Lipides et cires	2 à 4
Protéines	12 à 18
Cellulose	40 à 50
Cendres	7 à 9
Pectine	1 à 2

II.2.4. La levure

La levure de la bière est l'appellation courante d'un champignon unicellulaire microscopique naturellement présent dans l'air. Ce champignon microscopique possède la propriété de provoquer en atmosphère anaérobie la fermentation alcoolique de certains sucres, notamment le saccharose, le lactose et le maltose. Pour que le moût entre en fermentation, on lui adjoint donc de la levure qui influe de manière déterminante sur le caractère et la saveur de la bière. .

On distingue généralement deux types principaux de levures : celles à fermentation basse et celles à fermentation haute. Les deux types de levures influent sur le caractère de la bière et confèrent chacun au produit fini un goût caractéristique (De Jouffroy, 1977).

Tableau V : Les principaux types de levures brassicoles

Type de levure	Caractéristiques	Comportement en fermentation
Basse	<ul style="list-style-type: none"> -Température de fermentation : 5-15°C - Levures unicellulaires - Arome léger - Type de bière Lager 	Les levures à fermentation basse se déposent au fond de la cuve à la fin de la fermentation
Haute	<ul style="list-style-type: none"> -Température de fermentation : 15-25°C - Levure en chaîne - Arome plus fruité - Typique des bières de froment « Ale » 	Les levures à fermentation haute remontent pour former un chapeau à la surface du brassin sous l'action des bulles de gaz carbonique formée par la fermentation

II.2.4.1. Les caractéristiques principales de la levure brassicole

Les travaux de PASTEUR et HANSEN ont suscité beaucoup d'intérêts sur l'utilisation des cultures pures de levures. C'est le point de départ des travaux visant la caractérisation, la sélection et l'amélioration génétique des souches qui sont fortement stimulés par les récents acquis du génie

génétique. Selon KEYN et HOUGH (1971), les caractéristiques souhaitables dans une levure de bière sont :

- La capacité de fermenter le moût (fructose, glucose, sucrose, maltotriose, maltose) rapidement
- Une fermentation rapide sans excès de croissance de biomasse
- La capacité de produire une bière de bonne saveur et d'arôme
- Une bonne conversion des sucres en éthanol
- Tolérance à l'éthanol
- Production d'arôme spécifique
- Bonne floculence
- Bonne stabilité génétique

Les levures utilisées dans les brasseries sont des souches particulières de *Saccharomyces cerevisiae*. Ces dernières sont spécifiques à chaque brasseur et sont tenues secrètes.

II.2.4.2. Besoins nutritionnels de la levure brassicole

Les levures, comme tous les champignons, sont hétérotrophes. Les levures doivent trouver dans le moût l'ensemble des nutriments essentiels à leur bon développement : sucres, azotes, sels minéraux et vitamines (Winemak, 2014)

- Les sucres (glucose, fructose, ...) servent de source de carbone, sont aussi nécessaire à la production de l'énergie. Leur dégradation conduit à la production d'alcool.
- L'azote, indispensable à la synthèse des protéines de la levure, est présent sous différentes formes : inorganique (minérale) comme les ions ammonium appelé azote ammoniacal ; organique comme les acides aminés, peptides et protéines
- Les sels minéraux : Magnésium, zinc, calcium, sodium, ... Ils sont essentiels à la physiologie de la levure et donc à la performance de la fermentation

- Les vitamines : acide pentathénique (vit B5), thiamine (vit B1), ... Ils permettent une croissance optimale des levures et améliorent leur survie en condition de stress.

L'oxygène est aussi indispensable pour réaliser la synthèse de facteurs de survie tels que les stérols et les acides gras insaturés qui jouent un rôle clé dans la structure de la membrane.

Tous ces éléments sont présents dans le moût de malt, c'est pour cela qu'il est considéré comme une solution idéale pour le développement de la levure. Cependant, de différents paramètres conduisent à une grande variabilité de la composition des moûts et un ajustement est parfois nécessaire.

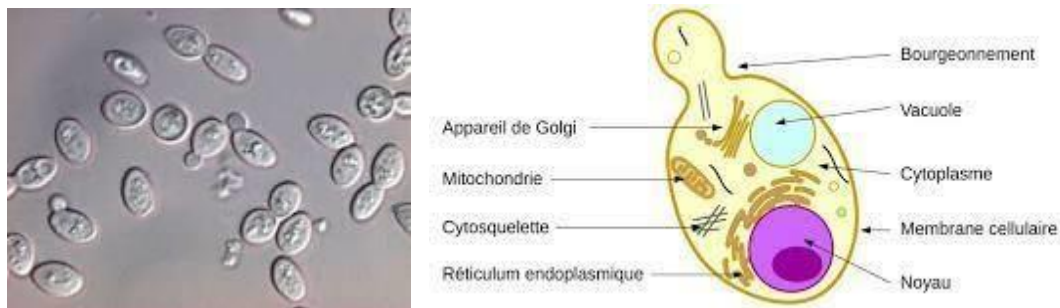
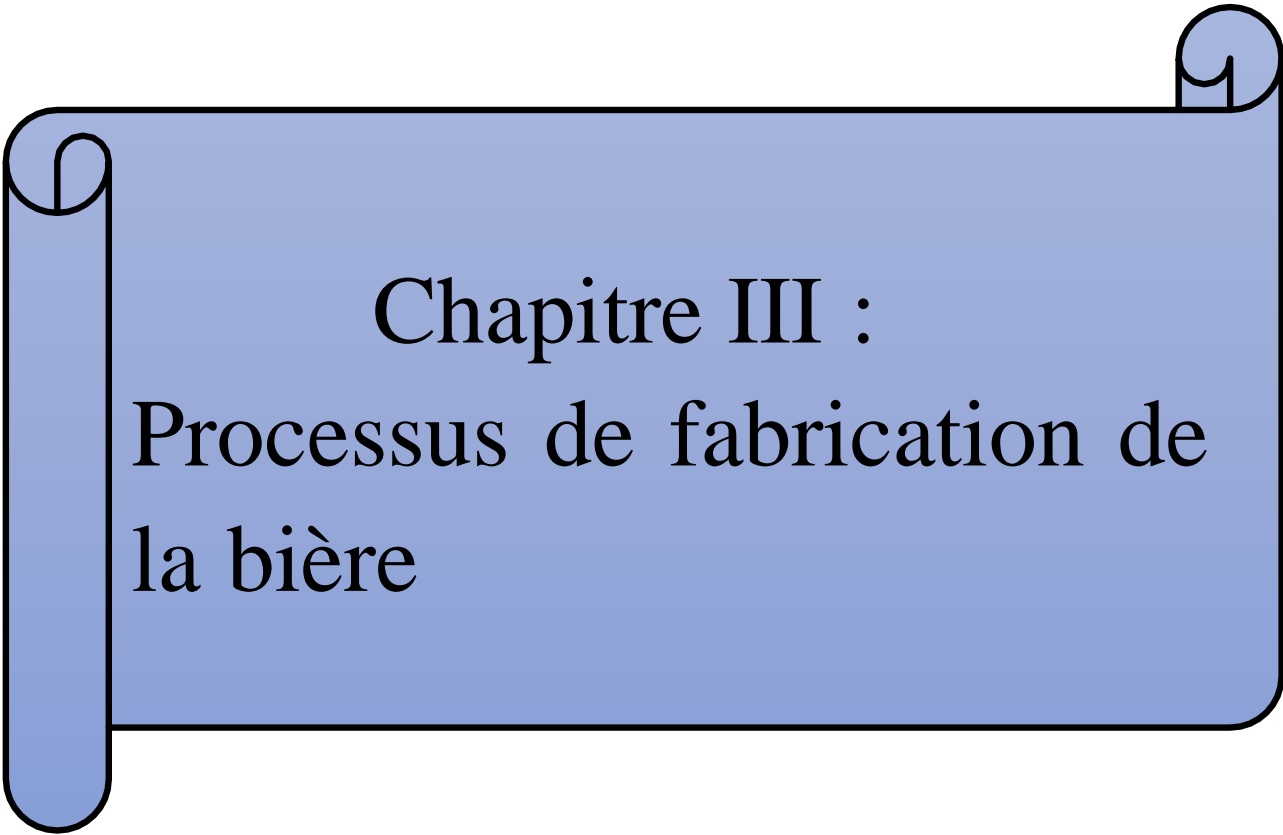


Figure 6.a. Levures vues au microscope **b.** Schema de la levure

II.2.5. Les produits d'ajout

Selon le journal officiel français du 8 novembre 1997, l'emploi pour la fabrication de la bière de certains produits autres que le malt et le houblon est toléré jusqu'à concurrence de 15%.

Il s'agit principalement des matières amylacées soit solides comme le blé, le riz, le sorgho, le maïs, ... ; soit liquide (sirops de glucose, de saccharose et de caramel) (Bigoin *et al.*, 1998). Ces matières amylacées ajoutées ont pour objectif de réduire le prix de revient, améliorer la stabilité colloïdale et produire des bières plus légères. Ces matières peuvent être incorporés selon différentes recettes au niveau de l'empâtage.



Chapitre III :
Processus de fabrication de
la bière

III. PROCESSUS DE FABRICATION DE LA BIÈRE

La fabrication et la perception de la bière reposent sur des phénomènes biochimiques bien connus. Les grains de céréales, généralement l'orge, subissent en premier lieu l'étape de maltage : ils sont trempés dans de l'eau pour enclencher leur germination puis séchés, donnant naissance au malt. Ce malt est ensuite concassé, hydraté et chauffé lors de l'étape du brassage, ce qui active les enzymes thermosensibles qui transforment l'amidon contenu dans la céréale en sucres simples (maltose, glucose). On ajoute une plante, le houblon, au moût ainsi obtenu qui est porté à ébullition. Enfin, des levures sont ajoutés, qui fermentent les sucres en alcool.

III.1. Traitement de l'eau

Dans notre environnement, l'eau est un élément qui joue un rôle majeur aussi bien au point de vue biologique (source d'eau potable pour l'homme) que du point de vue industriel. Il est donc fondamental d'exercer un contrôle de la qualité de l'eau et, le cas échéant, d'effectuer une épuration.

L'eau est un élément important pour la bière, tant par sa quantité (90 à 95% de la bière) que par sa qualité car ses différentes caractéristiques chimiques et physiques interviennent dans le type, le goût, les propriétés nutritionnelles ainsi que la couleur de la bière. Une bière aura un goût différent si on modifie la source d'eau.

L'eau intervient à trois niveaux dans les brasseries :

- Le brassage nécessite une eau potable
- Le nettoyage et la stérilisation nécessite également une eau potable et exempte de faux goûts
- Le fonctionnement des dispositifs comme les générateurs de vapeur et les dispositifs de refroidissement et de pasteurisation permet l'utilisation d'une eau non potable mais claire.

a. Les principaux critères d'une eau de brassage

- **La clarté et la limpidité** : L'eau doit être la plus claire et limpide possible ;

- **Le pH** exerce une influence sur la capacité des enzymes à dégrader l'amidon, sur l'extraction de composés non désirés comme les tanins contenus dans l'enveloppe du malt si le pH est trop élevé et sur l'amertume.

En effet, si le pH est trop élevé, l'amidon n'est pas totalement décomposé et il y a libération de tannins ; ce qui donne lieu à une sensation astringente (resserrement des papilles gustatives). L'eau initiale doit avoir un pH compris entre 5,5 et 6 alors que le pH de la bière finale est de l'ordre de 4 (le malt torréfié est acide) ;

- **La dureté de l'eau** (teneur en sels minéraux) dépend de la nature des terrains traversés par l'eau et du climat. Une eau douce est pauvre en sels minéraux (traversée de terrains argileux et siliceux) alors qu'une eau dure est riche en sels minéraux (recoupe de terrains calcaires, sulfatés ou riches en minéraux).

Ce paramètre est très important car il exerce plusieurs influences sur le pH du moût ; l'action des enzymes lors de la libération des sucres fermentescibles ; l'amertume ; la coagulation des protéines lors de la phase d'ébullition et la couleur finale de la bière.

b. Les sels minéraux les plus influents

- **Le calcium** (Ca^{2+}) joue plusieurs rôles durant le brassage : il réduit l'acidité du moût, il favorise les réactions enzymatiques de précipitation des protéines (nutriment utile à la levure) pendant l'ébullition du moût et il stabilise la bière.

La concentration idéale se situe entre 50 et 300 ppm. Pour une teneur inférieure à 100 ppm, le calcium a également des effets positifs sur la saccharification, la clarification du moût et la floculation des levures. Si sa teneur est inférieure à 50 ppm, la correction se fait par ajout du gypse (CaSO_4).

Une partie du calcium se trouve sous deux formes principales : le calcaire (CaCO_3) qui a un caractère basique. Une eau calcaire doit faire l'objet d'une correction acidifiante et le bicarbonate (H_2CO_3) qui contribue à la sensation sèche en bouche et à l'astringence de la bière. Le taux de bicarbonate peut être réduit par ébullition

- **Les sulfates** (SO_4^{2-}) accentuent le goût sec et l'amertume de la bière. Par contre, ils diminuent le pH et le caractère aromatique des houblons. La concentration varie selon le type de bière.
- **Les nitrates** doivent être en faible quantité, souvent en-dessous de 50 ppm comme prescrit dans les eaux potables ;
- **Le magnésium** (Mg^{2+}) est un nutriment essentiel pour la levure s'il est présent à faible dose (10-30 ppm). Il possède les mêmes propriétés que le calcium sauf qu'il acidifie le mélange. Au-delà de 50 ppm, il augmente l'acidité, l'amertume et la sécheresse de la bière et donne un petit goût aigre à la bière ;
- **Le sodium** (Na^+) accentue la rondeur et le corps de la bière. La concentration se situe entre 10 et 150 ppm. Au-delà de 200 ppm, le sodium fournit un goût salé non désiré à la bière ;
- **Le potassium** (K^+) a un effet de stimulation du goût. Une concentration supérieure à 10 ppm donne généralement un goût salé non souhaité ;
- **Les chlorures** (Cl^-) améliorent le corps, la rondeur et la complexité de la bière en faible concentration (0-150 ppm). Au-delà, ils fournissent un goût non souhaité de chlore ou de médicament. Le chlore est utilisé dans le traitement des eaux de ville pour son rôle antibactérien. En présence d'une teneur excessive, une ébullition ou une aération préalable est nécessaire, le chlore se dégradant relativement vite ;
- **Le fer** doit être présent en faible quantité. Une eau riche en fer a tendance à tuer la levure, à altérer la saveur de la bière, à atténuer l'acidité d'une bière, à favoriser les réactions d'oxydation et à augmenter la sensibilité de la bière au froid. Le fer donne un goût métallique, un aspect trouble et rougeâtre en coprécipitant avec les polyphénols
- **Le manganèse** perturbe la fermentation
- **Le cuivre** en excès est toxique pour la levure
- La teneur en matières organiques doit être la plus faible possible. Elle a tendance à absorber les sucres et ainsi réduire le taux d'alcool souhaité (Benoît J., 2021).

Une eau destinée au brassage convient donc rarement telle qu'elle se présente aux sources ou aux forages. On peut y trouver une grande diversité d'ions en proportion différentes. Toutefois, il est possible de corriger la composition minérale d'une eau par différents traitements :

- Résines échangeuses d'ions, traitement à la chaux (augmentation du pH),
- Ajout d'acide lactique ou d'acide chlorhydrique, de citron ou d'un houblon acidifiant de type Sauer maltz qui contient naturellement de l'acide lactique (acidification du liquide),
- Apport d'ions souhaités sous forme de gypse (sulfate de calcium), de sel d'Epsom (sulfate de magnésium), de sel (NaCl), de chlorure de calcium (CaCl), de craie (CaCO₃),
- Décarbonatation (addition de chaux, décantation ou précipitation des carbonates par chauffage)
- Traitement bactériologique (filtre à charbon actif)
- Avec des résines échangeuses d'ions
- Osmose inverse, etc.

III.2 Les étapes de fabrication de la bière

D'une manière générale, la fabrication de la bière comporte essentiellement cinq étapes : le maltage, le brassage, la fermentation, la filtration et le soutirage (conditionnement).

III.2.1. Le maltage

Le maltage est la première étape de la fabrication de la bière. Cette étape consiste à la transformation de l'orge en malt en modifiant l'état moléculaire de l'orge pour être apte au brassage. Le système consiste à faire germer les grains d'orge et ensuite les arrêter plus au moins rapidement suivant les caractéristiques attendues.

Le maltage a pour but de développer dans l'orge toutes les enzymes (les diastases) nécessaires pour le brassage, de donner aux grains sa fiabilité pour permettre la transformation de l'amidon en sucres fermentescibles et de donner à l'orge un arôme plus élevé.

Le processus de maltage est composé de plusieurs étapes, en commençant par le nettoyage suivi du trempage, la germination, le touraillage et le dégermage.

❖ **Le nettoyage :**

Enlever les poussières, les cailloux, les parasites, les autres grains, les grains cassés, ...

❖ **Le trempage :**

Essentiel et préalable à la germination, le trempage consiste en une réhydratation de la graine en vue de la germination. Cette humidification permet de sortir la graine de sa phase de dormance en réactivant son métabolisme. Le trempage au travers de l'eau agit successivement sur la graine : pénétration de l'eau dans l'amande, ramollissement des téguments de la graine, permettant le passage au stade de jeune plante, et mise en solution des différents composés chimiques nécessaires à la première alimentation de l'embryon. Ainsi, durant 48 à 72h le grain est immergé entre 13 à 15 °C pour atteindre un taux d'humidité qui varie entre 40 et 45%.

❖ **La germination :**

C'est la période durant laquelle l'orge va commencer à germer. Au cours de la germination, l'embryon acquiert une vie active et secrète des enzymes « les diastases ». Est alors activé une enzyme majeure, l' α amylase. Dès lors, l'enzyme va hydrolyser une faible quantité de l'amidon (environ 5%). Les cytales, xylases et pectases, vont entraîner une liquéfaction des parois cellulaires. Lorsque les germes ont atteint une longueur de 2 ou 3mm, la germination est interrompue afin d'éviter que l'embryon ne se nourrisse pas des sucres du grain. La germination dure entre 8 à 9 jours si l'on a eu soin de maintenir la température entre 16 et 18°C. le produit obtenu s'appelle le « malt vert »

❖ **Le touraillage :**

Le touraillage est l'étape de séchage du malt vert (son humidité passe de 45 à 4%). Cette étape présente deux intérêts majeurs. Elle permet de sécher la graine et de stopper la germination qui, à terme, consommerait l'ensemble des ressources en sucre de la graine et de développer un arôme et une coloration au malt.

Les grains sont d'abord chauffés à 45°C pendant une trentaine d'heure, puis il y'a une chauffe appelé « coup de feu » dont la température dépend du produit final désiré. La température peut aller de 85°C à 220°C. Cette chauffe permet de donner au grain ses propriétés gustatives. Les grains chauffés à 85°C seront utilisés pour les bières blondes alors que les grains chauffés à des fortes températures et donc grillés seront utilisés pour les bières brunes.

Ce changement de coloration et des propriétés organoleptiques du malt est dû au réaction de Maillard. En effet, le brunissement des acides aminés se produit en présence de sucre et d'eau lors d'une élévation de température. Plus le grain est torréfié, plus les arômes sont forts mais moins il y'a d'enzymes présents dans le grain. Cette montée de température a comme effet la dénaturation des enzymes (Goemaere *et al.*,2016).

❖ **Le dégermage :**

Elle consiste à débarrasser le malt de ses radicules. A l'issue de cette étape, le malt peut être conservé près d'un an.

De nos jours, le maltage est effectué par un malteur plus souvent que par le brasseur lui-même.

III.2.2. Le concassage

La fabrication de la bière commence par le concassage du malt. Le but de cette opération est d'écarter les grains du malt, en évitant de faire la farine. Les enveloppes des grains doivent rester aussi entières que possible afin de construire un lit filtrant pour l'opération de filtration. Par ailleurs, les particules internes doivent être assez fines pour fournir un maximum de surfaces d'attaque aux enzymes lors de l'empâtage afin d'obtenir une bonne saccharification. Le moulin est réglé de façon à obtenir un profil granulométrique répétable garantissant un moût clair et le meilleur rendement de brassage.

Le concassage s'opère dans des appareils à cylindres : le grain éclate sous l'action des cylindres et les enveloppes sont respectées.



Figure 7 : Le malt concassé

III.2.3. Le brassage

L'objectif principal du brassage est d'élaborer un liquide chaud appelé « moût » ou « brassin » prêt à fermenter. Pour cela, il faut d'une part, libérer les différents éléments du malt (protéines, amidon, enzymes) et ensuite les différents sucres fermentescibles présents dans l'amidon (glucose, maltose, maltotriose, fructose, saccharose) et d'autre part, ajouter à ce liquide en cours de chauffe, le houblon, les sucres et les éventuels ingrédients secondaires.

Le brassage nécessite plusieurs opérations :

- **L'empâtage :**

Le but est de libérer les sucres fermentescibles et autres matières contenus dans l'amidon par réactivation des enzymes et rupture par gonflement de l'amidon. Ce qui nécessite une saturation en eau.

La farine de malt est mélangée à une quantité déterminée d'eau pour former un mélange pâteux appelé maische, brassin ou encore pain liquide en raison de sa composition et de sa nature. Les grains crus des autres substances amylacées sont ajoutés en cours de cette étape.

La maische est ensuite chauffée à différentes paliers température afin d'activer les enzymes sans pour autant les dénaturer (détruire). La maische doit être sans cesse mélangée ou brassée afin d'uniformiser la température et d'éviter une caramélisation du moût pendant la chauffe. Le nombre et la durée de chaque palier dépendent de type de bière.

Les paliers pouvant être réalisés sont représentés dans le tableau ci-dessous

Tableau VI : Variation des propriétés de la bière en fonction des paliers de température (Alain *et al*, 2004)

Température	Activités enzymatiques	pH optimal	Influences sur la bière
Entre 45 et 55°C	Protéases activés : dégradation de protéines et peptides en acides aminés	4,5 – 5,5	Tenue de la mousse Limpidité
Entre 55 et 60°C	Début de formation du maltose par α -amylase		Degré d'alcool Bière plus mince
Entre 60 et 65°C	Activité maximale de la α -amylase	5,2 – 5,6	
Entre 65 et 70°C	Formation croissante de dextrines par l' β -amylase Formation décroissante de maltose		Corps de la bière Bière plus moelleuse
Entre 70 et 75°C	Activité maximale de l' β -amylase	5,3 – 5,8	
Au-delà de 75°C	Destruction des enzymes		

● **La filtration :**

La filtration consiste à séparer le liquide sucré : le moût, de la phase pâteuse appelé «la drêche » par filtration à travers un filtre (cuve-filtre ou filtre-presse) mais également à travers la matière solide qui joue également le rôle de filtre naturel. La drêche est ensuite rincée à l'eau chaude (76°C) afin d'en extraire le maximum de sucres encore présents et collés aux fragments de coque en vue d'améliorer le rendement.

Le liquide ainsi récupéré appelé « eau de lavage » est alors, soit ajouter au moût, soit sert à produire une bière moins fortement alcoolisée. La drêche finale composée de résidus des substances amylacées peut être utilisée, soit comme aliment de bétail en raison de sa teneur élevée en protéines, fibres, sucres, ... , soit dans de nombreuses applications (pain, nouilles, cookies, papier W.C, ...)

● **L'ébullition :**

Le moût primaire accompagné éventuellement de l'eau de lavage est porté à ébullition dans une cuve. Ce processus permet de libérer les arômes et les tannins. Peu à peu le moût subit une concentration pour atteindre la teneur en essence souhaitée (moût primitif). Par « moût primitif » on entend l'extrait dissous dans le moût avant fermentation. Elle s'exprime en grammes d'extrait

dans 100 grammes du moût ou de bière. Par conséquent, lorsqu'on dit d'une bière qu'elle a un extrait primitif de 15%, cela signifie que le moût dont elle provient renfermait avant fermentation 15 grammes d'extrait dans 100 grammes de moût.

Le houblon peut être ajouté en une ou plusieurs fois et la dose du houblon par hectolitre de moût varie suivant l'extrait primitif et le type de bière. Une bière pâle est plus houblonnée qu'une bière foncée de même extrait primitif. Une bière de fermentation haute est généralement plus houblonnée qu'une bière de fermentation basse (Doumbaye, 1991)

Durant l'étape d'ébullition et houblonnage, plusieurs événements majeurs se produisent. L'European Brewery convention a publié des guidances sur la fabrication de la bière appelées « manuel de bonnes pratiques » dans lequel Denkel liste les onze (11) principaux changements effectifs durant la phase d'ébullition (Denkel *et al*, 2000) :

- Inactivation des équipements enzymatiques du malt
- Stérilisation du moût
- Extraction et isomérisation des composants du houblon
- Mises en place des goûts et de la couleur
- Formation de composés réducteurs pour limiter l'oxydation dans la suite du processus
- Baisse du pH
- Formation des complexes protéines-polyphénols
- Concentration du moût par évaporation
- Agrégation des protéines
- Evaporation des composés volatiles issus de l'empâtage
- Evaporation des composés volatiles du houblon

● **Refroidissement et clarification :**

Le moût chaud est transféré dans un bac appelé « whirlpool » où il subit une décantation des particules en suspension. Le temps de séjour du moût dans le whirlpool varie entre 20 et 30 minutes avant le début de refroidissement.

Pour refroidir le moût et le porter à la température de fermentation, on le passe sur un réfrigérant fermé formé par de plaques métalliques minces, entre lesquelles circulent le moût et l'eau de refroidissement. Le refroidissement rapide permet de limiter le risque de contamination.

Au début du refroidissement, un mouvement de rotation peut être réalisé dans le moût afin de concentrer au milieu de la cuve, un maximum de résidus de houblon et de céréales grâce à la force centrifuge. Ces résidus peuvent être ainsi mieux récupérer par la suite.

Ainsi, le moût obtenu généralement de plus au moins 12°Plato (cas de la BSA) possède les caractéristiques suivantes :

Tableau VII : composition du moût de 12°Plato

Composants	Quantité	
Extrait fermentescible (80% composé essentiellement de glucides)	Glucose	10 g/l
	Fructose	1g/
	Saccharose	4 g/l
	Maltose	55 à 65 g/l
	Maltotriose	15 g/l
Extrait non fermentescible (20% composés principalement de dextrines, β glucanes et gommes)	Azote totale	800 à 1000 mg/l
	Azote coagulable	20 à 25% mg/l
	Azote aminé libre	130 à 220 mg/l
Liquide	Acides gras totaux	10 à 20 mg/l
	Phospholipides	3 à 9 mg/l
	Mono-di-triglycérides	6 à 10 mg/l
	Acides nucléiques	100 à 300 mg/l
	Polyphénols	150 à 250 mg/l
	Vitamines	30 à 50 mg/l
Eléments minéraux	Potassium	400 à 500 mg/l
	Phosphates	500 à 600 mg/l
	Sulfates	200 à 400 mg/l
	Magnésium	100 à 200 mg/l
	Calcium	50 à 120 mg/l
	Sodium	30 à 100 mg/l
	Chlorures	40 à 400 mg/l
	Zinc	0,1 à 0,2 mg/l
Nitrates	10 à 100 mg/l	
Acides iso-alpha-humulones	/	30 à 40 mg/l
Ph	/	5,2

III.2.4. La fermentation

Les étapes précédentes ont permis de produire une solution sucrée composée entre autre de sucres fermentescibles. Cette solution appelée le « moût » va alors être introduite dans un fermenteur etensemencée immédiatement de levure.

La fermentation se définit comme la transformation par la levure des sucres fermentescibles en éthanol et en gaz carbonique sous un domaine de température bien stricte et constante (Pascal, 2011).

On distingue deux grandes types de fermentations :

- ❖ **La fermentation basse** caractérisée par la présence de température de 5 à 15°C pour garantir le développement des levures de types *Saccharomyces Uvarum* ou *Pastorianus* qui se déposent en fin de fermentation dans la partie inférieure de la cuve. Les bières obtenues par fermentation basse sont de type Lager.
- ❖ **La fermentation haute** caractérisée par la présence de température de 15 à 32°C et de levure de type *Saccharomyces cerevisiae* qui forment un dépôt au-dessus de la bière. Ce type de fermentation nécessite souvent l'ajout des sucres et offre une plus grande diversité de bière généralement plus alcoolisées et aux arômes plus élaborés.

La fermentation du moût se déroule en 2 étapes :

III.2.4.1. La fermentation primaire :

Cette étape est complexe et fragile. Il comporte deux phases dans un fermenteur à l'abri de la lumière :

- La phase de la multiplication des levures par absorption de la totalité de l'oxygène présent dans le moût. Cette phase se déroule durant les premières 20 à 24 heures et permet d'atteindre une population idéale des levures. Il faut donc aérer le moût afin de faciliter le travail des levures.
- La phase d'attaque des sucres fermentescibles : une fois l'oxygène consommée, les levures transforment les sucres en alcool et gaz carbonique. En même temps, il se forme également des acides et des alcools supérieurs dont la combinaison forme des esters qui contribuent à

donner à la bière finie son cachet, son arôme particulier, bref ses qualités organoleptiques (Kabra , 2014)

L'absence d'oxygène dans le liquide évite également l'oxydation de l'alcool qui, en contact de l'air, a tendance à développer de faux goûts et à faire vieillir prématurément la bière sans pour autant l'améliorer (Benoît , 2021). Cette phase dure une semaine à 15 jours selon les levures et la recette. Elle s'arrête jusqu'à l'obtention d'une densité constante appelée « densité finale ».

Lorsque la fermentation est terminée, on sépare la levure du moût, soit en laissant se déposer comme en fermentation basse, soit en l'écument comme en fermentation haute, et en envoyant la bière dans des réservoirs ou tanks de garde, jusqu'au moment du débit.

a. Le métabolisme de la levure au cours de la fermentation

Le métabolisme du glucose chez *Saccharomyces cerevisiae* comprend deux types de catabolisme énergétique : la voie respiratoire et la voie fermentaire. Ces deux voies peuvent se déclencher selon plusieurs facteurs génétiques, environnementaux et nutritifs. Mais c'est la concentration du substrat (glucose) et l'aération (oxygène) qui déterminent principalement l'orientation du métabolisme et jouant un rôle important dans les mécanismes de régulation et d'activation des voies métaboliques chez *Saccharomyces cerevisiae* (Faure,2005)

Ainsi en présence d'oxygène et de source de carbone, ce sont les phosphorylations oxydatives qui sont privilégiées, satisfaisant les besoins de l'organisme en ATP (effet Pasteur).

Lorsque la quantité d'oxygène diminue, c'est la glycolyse qui est stimulée entraînant une consommation accrue en glucose pour fournir l'ATP nécessaire. Cependant, quand la concentration en glucose atteint un certain seuil, même en présence d'oxygène, le métabolisme bascule vers le catabolisme respiro-fermentaire (effet Crabtree).

- **Effet Pasteur** : Il a été découvert en 1861 par Louis Pasteur qui a constaté une diminution de la consommation de substrat et de la production d'alcool accompagnée d'une augmentation de la quantité de biomasse formée en aérobiose (Voet *et al.*, 2005).
- **Effet Crabtree** : L'effet Crabtree a été décrit comme un process fermentaire avec inhibition de la respiration en présence d'oxygène quand la concentration en glucose atteint

un certain seuil. Ainsi, la levure passe d'un métabolisme purement oxydatif à un métabolisme oxydo-réductif (Diaz-Ruiz, 2010).

b. La glycolyse

La glycolyse, comme son nom l'indique est la dégradation successive du glucose en pyruvate accompagné de consommation, puis formation d'ATP. La glycolyse se déroule dans l'hyaloplasme. Dans le cas de la levure, les sources de glucose sont tous les sucres fermentescibles, sachant que la plus grosse molécule de sucre fermentescible est le maltose (ou isomères disaccharides), qui est cassé en deux molécules de glucoses grâce à l'enzyme invertase secrétée par la levure dans le milieu extérieur. Ce processus est catalysé par dix enzymes cytosoliques, et tous les intermédiaires sont des composés phosphorylés.

DEGRADATION DU GLUCOSE OU GLYCOLYSE (voie d'Embden-Meyerhof)

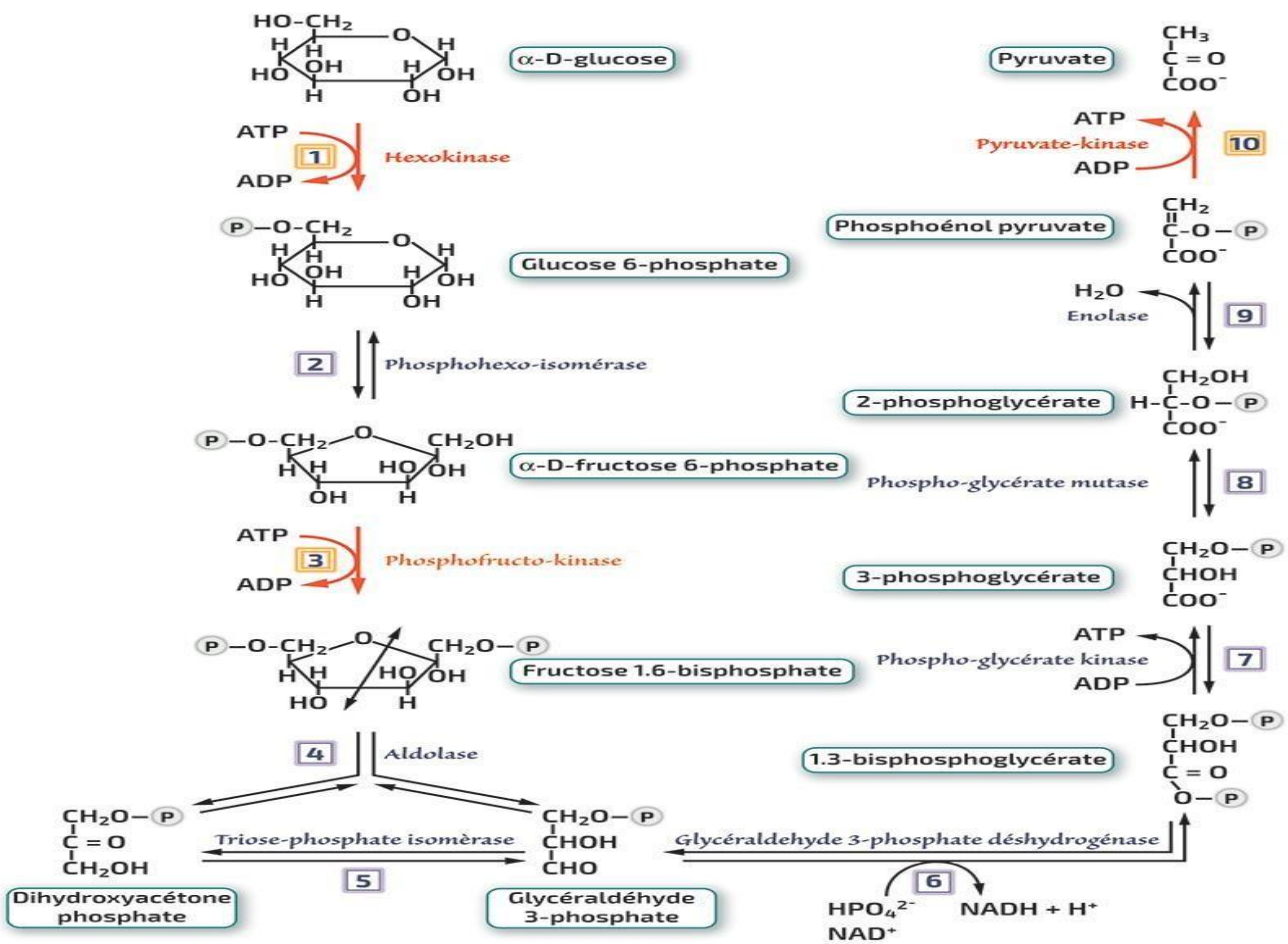


Figure 8 : Schéma générale de la glycolyse

La dégradation d'une molécule de glucose forme 2 ATP et réduit 2 NAD. L'équation générale de la glycolyse est :



c. Devenir du pyruvate

Le pyruvate, produit finale de la glycolyse suit alors des voies différentes selon les conditions métaboliques :

- **La décarboxylation oxydative suivie du cycle de krebs** en aérobiose : oxydation du pyruvate en CO_2 et en H_2O .
- **Fermentation alcoolique** en anaérobiose : le pyruvate est converti en acétaldéhyde et le CO_2 est libéré. L'acétaldéhyde est ensuite réduit par le NADH pour produire l'éthanol.

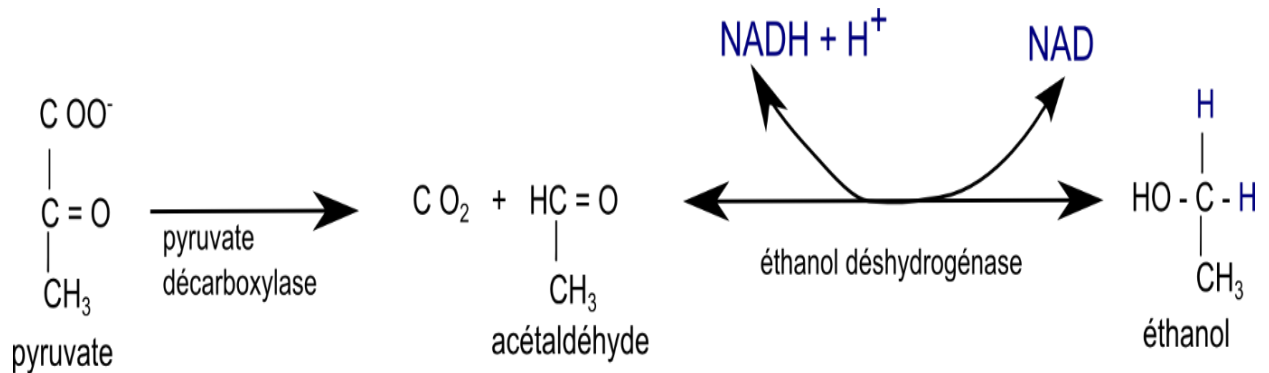


Figure 9 : Biochimie de la formation alcoolique (formation de l'éthanol)

III.2.4.2. La fermentation secondaire ou la garde

A la fin de la fermentation primaire, le liquide appelé « bière verte » est ensuite refroidi à une température proche de 0°C et maintenu à cette température dans un citerne ou cuve de garde durant un à plusieurs mois selon le type de bière. A cette température, les levures continuent à travailler lentement et complètent la fermentation primaire.

Cette étape permet d'obtenir :

- Une clarification de la bière par dépôt des dernières levures ayant accompli leur travail dans la partie inférieure (fermentation basse) ou dans la partie supérieure (fermentation haute)
- Une meilleure saturation en gaz carbonique
- Un affinage des saveurs
- Les qualités digestives de la bière.

III.2.4.3. Les métabolites secondaires et la production d'aromes

Le pyruvate occupe une place centrale dans les réseaux métaboliques et certains de ses dérivés présentent des propriétés organoleptiques. La production d'éthanol est bien sûr la première contribution de la levure au goût de la bière mais la flaveur caractéristique d'une bière vient des autres métabolites produits au cours de la fermentation primaire ou de la fermentation secondaire. Ces arômes sont des produits du métabolisme carboné et azoté des levures, mais peuvent également être issus de la simple hydrolyse de composés présents dans la bière.

Les composés aromatiques de la bière sont classés en deux groupes :

- ✓ Les composés qui ont une influence favorable sur l'arôme de la bière : les alcools supérieurs, les esters, les aldéhydes, les acides volatils.
- ✓ Les composés défavorables : le diacétyle, l'hydrogène sulfureux, des mercaptans.

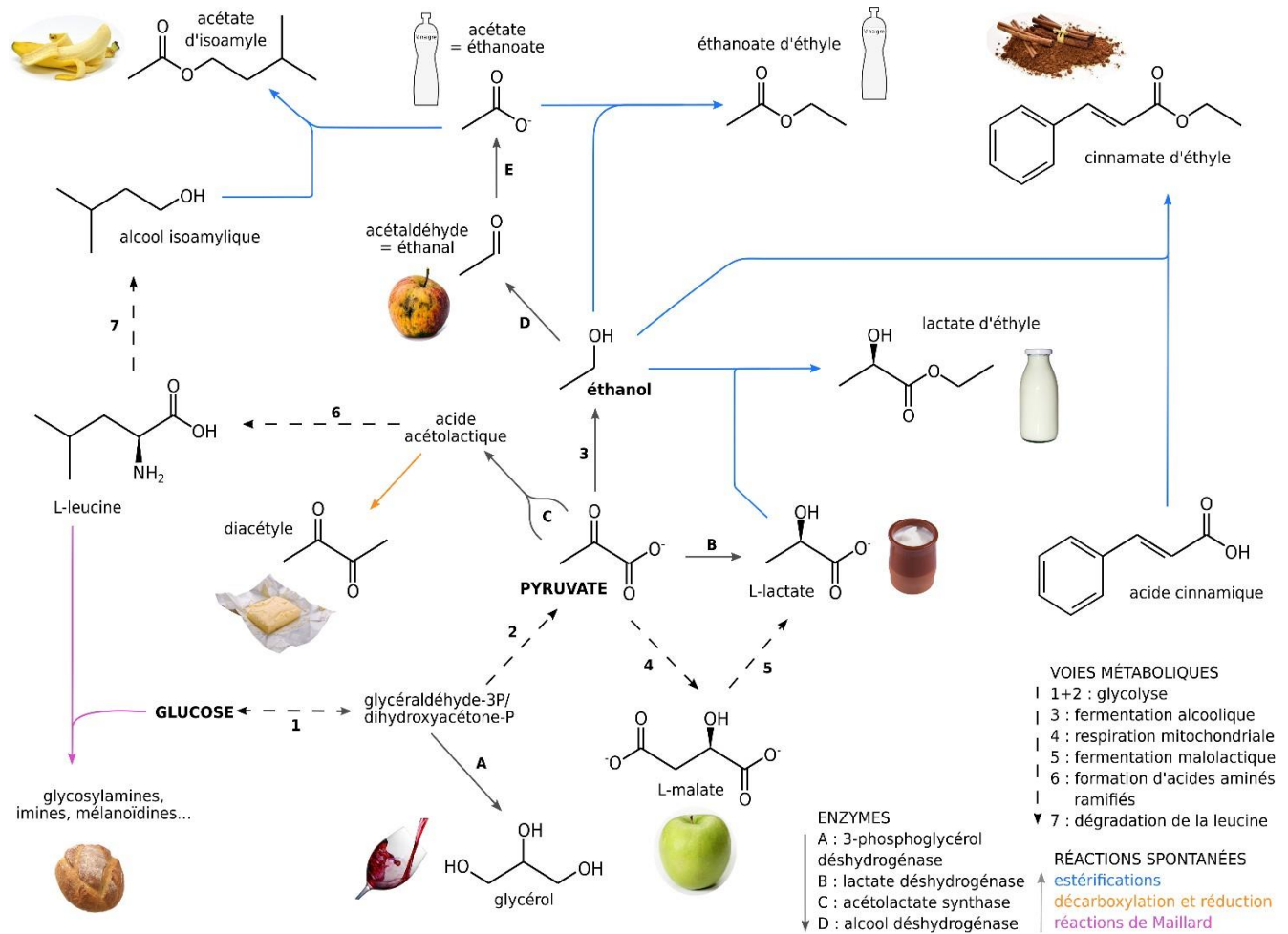


Figure 10 : Exemple de voies de synthèse impliquées dans la formation de composés organoleptiques chez *S. cerevisiae* et ayant une importance (négative ou positive) dans les boissons fermentées

III.2.5 La filtration

La filtration a pour objectif d'éliminer toutes les particules « indésirables » restantes de la bière, principalement la levure et les protéines, afin d'obtenir une bière brillante et la suppression du risque de trouble colloïdal. Le trouble colloïdal est dû à la formation de liens de faible énergie (ponts hydrogènes) entre essentiellement les protéines et les polyphénols.

L'élimination de la levure résiduelle consiste à filtrer sur un lit de terre de diatomées (Kieselguhr) ou au moyen d'un polisher (centrifugeuse très puissante). Pour la séparation des protéines, le processus est similaire mais nécessite l'ajout préalable d'adjuvants technologiques sans effet organoleptiques comme un gel de silice, les tannins ou encore les dérivés du Nylon.

III.2.6 Le conditionnement

Le conditionnement consiste à introduire la bière dans son contenant final (bouteille en verre, canette ou fût). Il est également appelé le « soutirage » ou le « packaging ».

La bière doit conserver, durant le conditionnement et l'entreposage, toutes les propriétés acquises lors du brasage et de la fermentation (saturation en gaz carbonique, mousse, imperméabilité aux éléments extérieurs, ...) ; elle doit être protégée d'une éventuelle oxydation et le dégazage de la bière doit être évité.

Pour débiter, des opérations de nettoyage et de désinfection du contenant sont nécessaires. Par la suite, le processus consiste à remplir le contenant en position verticale et à laisser un léger débordement de la mousse afin de chasser l'air éventuel hors du contenant. Le système est rapidement fermé souvent via un dispositif automatique (Benoît, 2021)

Seules les bières en bouteilles et en canettes vont subir une pasteurisation. La pasteurisation consiste à réchauffer la bière après soutirage de celle-ci par le passage du récipient dans un tunnel et arrosage d'eau chaude pour atteindre les conditions normalisées de pasteurisation (température : 62-65°C et durée : 10 minutes). Le récipient est ensuite refroidi par ruissellement d'eau froide.

La pasteurisation a pour but de détruire un certain nombre de micro-organismes néfastes sous des conditions bien déterminées de température et physico-chimiques du milieu ambiant afin de maintenir une certaine activité levurienne. Elle permet ainsi une meilleure conservation de la bière. Toutefois, ce procédé altère un peu la qualité de la bière.

Certaines brasseries utilisent une flash pasteurisation. Cette dernière consiste en une augmentation très rapide de la température (65-72°C) et une durée réduite (une trentaine de secondes). Elle se fait généralement avant soutirage de la bière et convient mieux pour les bières en fût. Elle permet de réduire l'impact sur le goût et l'arôme de la bière.

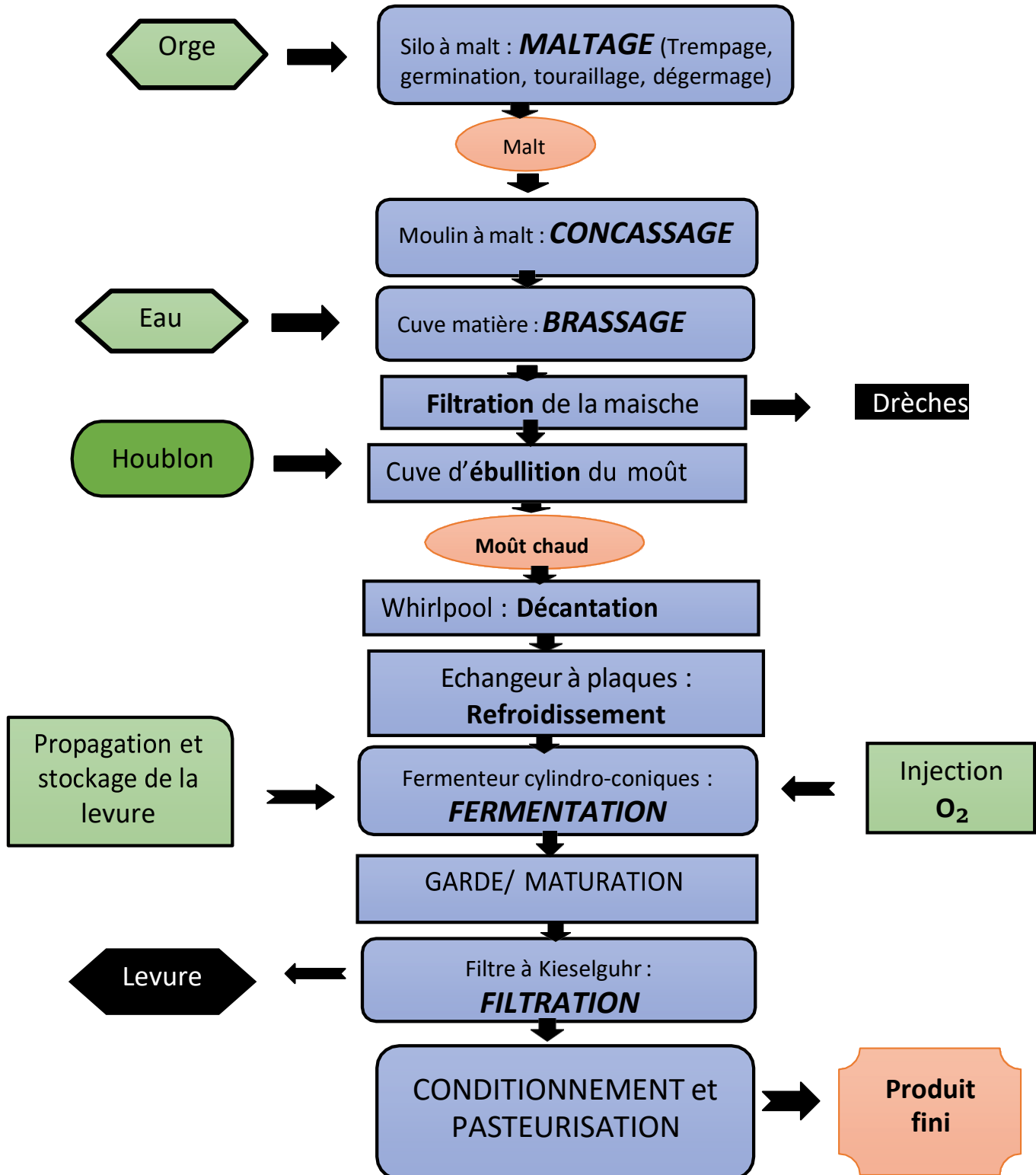


Figure 11 : Diagramme de la fabrication de la bière



PARTIE
PRATIQUE



Chapitre IV :
Matériels et Méthodes

IV. MATERIELS ET METHODES

L'élaboration d'une recette fait appel à des calculs théoriques pour déterminer les différents paramètres d'une bière. La connaissance de ces paramètres permet un contrôle de sa production afin de s'assurer de la qualité et de la répétabilité de son brassage. Des analyses physico-chimiques sont effectuées sur les différentes matières premières de la bière (malt, eau, houblon et levure) dans le but de confirmer leurs compositions ou d'identifier des défauts. Dans une brasserie, les analyses physico-chimiques portent surtout sur l'eau, le moût et la bière. D'autres analyses sont effectuées à savoir : analyses microbiologiques et analyses organoleptiques.

Nous avons proposé de faire une étude et un suivi de la fermentation. Nous avons opté pour la démarche expérimentale suivante : durée de suivi de la cuve de fermentation est de 15 jours et on a suivi 14 paramètres tous les jours pour le même fermenteur.

IV.1. LES METHODES D'ANALYSE

1. Potentiel d'hydrogène (pH)

- **Définition :**

Le potentiel hydrogène (pH) permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'une solution. Il est défini comme le logarithme négatif de la concentration en ions hydronium et varie de 0 à 14 dans une solution.

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+].$$

Le pH est mesuré à l'aide un pH-mètre avec compensation automatique de température.

- **Principe :**

Le pH-mètre est composé d'un millivoltmètre électrique relié à deux électrodes rassemblées dans la sonde. Il mesure la **différence de potentiel** (tension) entre ces deux électrodes. Cette différence est directement liée au pH de la solution dans laquelle la sonde est immergée. L'une des électrodes est appelée « **électrode de référence** au calomel (Hg) saturé et son potentiel E est constant à une température donnée. L'électrode de verre est **l'électrode indicatrice de pH** et son

potentiel est une fonction affine du pH. Par conséquent, la tension E mesurée par le millivoltmètre est de la forme suivante : $E = E_{\text{verre}} - E_{\text{ref}}$

- **Matériels** : Becher de 100ml ; pH-mètre
- **Mode opératoire** :

S'assurer que le pH-mètre est étalonné ; prélever environ 50 à 100 ml d'échantillon à analyser dans un bécher ; rincer la sonde du pH-mètre avec l'échantillon puis plonger la sonde dans l'échantillon. Après stabilisation, lire directement la valeur sur l'écran du pH-mètre.



Figure 12 : pH- mètre

2. Mesure de la turbidité

- **Définition** :

La turbidité désigne la teneur d'une solution en particules suspendus qui la troublent. Elle est déterminée à l'aide d'une néphélométrie NTU (turbidimètre) et exprimée en EBC. Sachant que : 1 EBC = 4NTU.

- **Principe** :

Le turbidimètre mesure la lumière diffuse causée par les particules. La turbidité d'une matière est proportionnelle à la longueur d'onde.

- **Matériels** : Flacon ou bouteille ; turbidimètre

- **Mode opératoire :**

Contrôle et assurance de la propreté de l'appareil. Le flacon d'échantillon doit aussi être propre et exempt de dépôt, tâches et marques susceptibles de fausser les résultats ; placer le flacon d'échantillon dans la chambre de mesure qui est remplie d'eau. La mesure est entièrement automatisée. Lire la valeur directement sur l'écran (EBC)



Figure 13 : Turbidimètre Vos Rota (Haffmans)

3. Mesure de la densité

- **Définition :**

La densité d'une substance est le rapport de la masse volumique de cette substance divisée par la masse volumique d'une substance de référence. Dans le cas des liquide, la référence est l'eau à 4°C (la densité de l'eau à cette température est égale à 1kg/L).

Elle est mesurée à l'aide d'un densimètre (saccharimètre) ou aéromètre. La température de l'échantillon doit être autour de 20°C. Il existe d'autres méthodes de mesure de la densité à savoir : méthode au pycnomètre, méthode au refractomètre, densimètre numérique (tube en U) et la méthode de la thermodynamique chimique.

- **Principe :**

La mesure de la densité d'un liquide est basée sur le principe d'Archimède. Le densimètre calibré s'enfoncera plus ou moins en fonction de la densité du liquide. Il est gradué en gramme d'extrait pour 100g de liquide. La lecture s'effectuera en se référant à la densité à 20°C.

- **Matériels :** Eprouvette en verre avec support en acier inox ; erlenmeyer de 1000 ml ; entonnoir ; papier filtre ; kieselguhr fin ; densimètre.

- **Mode opératoire :**

Prélever un échantillon du moût préalablement filtré ; rincer le verre à pied avec l'échantillon à analyser puis verser l'échantillon dans le verre à pied ; rincer le densimètre avec l'échantillon et plonger le densimètre dans le liquide en le tournant en spires ; attendre la stabilité de l'appareil pour la lecture qui se fait au niveau supérieur du ménisque ; lire la température sur le thermomètre du densimètre et en se référant au tableau de correction, on détermine la densité à 20°C. Après chaque utilisation, le densimètre sera rincé à l'eau distillée.



Figure 14 : Densimètre / Saccharimètre (Aréomètre)

4. La couleur

- **Principe :**

L'absorbance du moût et de la bière est mesurée à la longueur d'onde de 430 nm avec un facteur 25. La couleur obtenue sera exprimée en unité EBC.

- **Matériels :** entonnoir ; erlenmeyer de 250 ml ; kieselguhr fin ; cuvette en verre ; spectrophotomètre.

- **Mode opératoire :**

La bière doit être dégazée avant l'analyse. Pour ce qui est du moût, il faut filtrer sur papier filtre. Fixer la longueur d'onde à 430 nm et le facteur 25. Avant toute analyse, employer un blanc (eau distillée) puis appuyer sur la touche « auto- blanc » pour obtenir une lecture de 0,00. Toujours travailler avec une réponse inférieure à 0,8 d'absorbance. Si ce n'est pas le cas, faire une dilution de l'échantillon.



Figure 15 : Spectrophotomètre UV-V=visible

5. Comptage cellulaire et taux de mortalité

C'est une numération du nombre de cellules vivantes et mortes de levure par unité de volume, très souvent par ml de culture analysée. La numération est faite à l'aide d'un hématimètre (lame de Malassez).

- **Matériels** : Bleu de méthylène ; eau distillée ; flacon de prélèvement ; pipette pasteur ; tube à essai, pipettes (de 10 ml et de 1 ml) ; lame de Malassez ; lamelle ; spectrophotomètre
- **Mode opératoire** :
 - Prélever un échantillon de bière, agiter pour rendre la suspension de levure homogène ;
 - Dans un tube à essai, mélanger 1ml de l'échantillon avec 1ml de bleu de méthylène et 8ml d'eau distillée (solution de 10ml) ;
 - Agiter le tube, puis prendre une goutte de la solution à l'aide d'une pipette pasteur sur la lame de Malassez (avec la lamelle) ;
 - Procéder à la lecture au microscope photonique : utiliser l'objectif 40X, puis amener dans le champ microscopique un rectangle composé de 20 carrés et compter les cellules qui s'y trouvent. Faire la même chose pour les 5 champs disposés en diagonale et prendre la moyenne des résultats. Au sein du même champ, les cellules mortes sont colorées en bleu.

Si la concentration en levure est trop élevée (plus de 200 cellules par champ) on réalisera au préalable une dilution au 1/10 ou au 1/100 si nécessaire, en prenant soin d'éviter les erreurs dues à la sédimentation.

Pour les calculs :

$$\text{Nombre de cellules par ml} = \frac{N}{16} \times 250 \times \alpha \times 1000$$

$$\text{Cellules mortes \%} = \frac{\text{Nombre de cellules mortes}}{\text{Nombre total de cellules}} \times 100$$

α : dilution et N : Nombre total de cellules

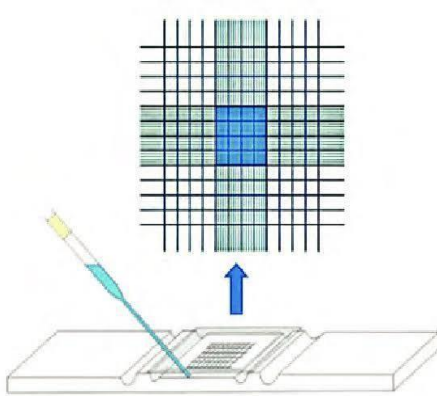


Figure 16 : Lame de Malassez



Figure 17 : Microscope optique

6. Dosage du diacétyl

Le diacétyl, à une concentration élevée dans la bière, engendre de mauvais goût. Il est donc très important de détecter sa présence. Le dosage de diacétyl est fait par la méthode de 1,2 phénylenediamine ou par la méthode de l' α naphthol. Dans notre cas, on a utilisé la méthode de l' α naphthol.

- **Principe :**

La réaction entre le diacétyl et l' α naphthol en présence de la créatine en milieu basique donne une coloration rose qui est mesurée au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 540 nm.

- **Matériels :** α -naphthol ; créatine ; éthanol 10% ; eau distillée ; bécher ; tubes à essai ; pipettes (1 ml, 5 ml et 2ml) ; cuvette en verre ; réfrigérant ; spectrophotomètre ; dispositif de distillation ; chronomètre.

- **Mode opératoire :**

- Distiller 100ml de bière sans dégazée (filtrée préalablement pour les bières en fermentation et en garde). Surveiller la formation de la mousse au début de la distillation ;
- Recueillir environ 20ml de distillat dans une jauge de 25ml, puis ajuster au trait avec de l'eau distillée et homogénéiser
- Placer la jauge de 25ml dans la glace.
- Prendre 1 tube à essai pour le blanc et mettre 5ml de la solution éthanolique à 10%, 4,2ml d'eau distillée et 0,6ml d' α naphthol
- Prendre 2 tubes à essai pour l'échantillon. Donc chacun des tubes, mettre un mélange de 5ml de l'échantillon, 4,2ml d'eau distillée et 0,6ml d' α naphthol.
- Agiter le tube et ajouter 0,2ml de créatine pour le blanc en mettant le chronomètre en marche
- Après une minute, ajouter 0,2ml de créatine dans l'échantillon 1, puis après une minute encore dans l'échantillon 2
- Après 9minutes, verser le blanc dans une cuvette et ajuster à une minute, la transmission à 100
- Passer en mode concentration
- A $t = 11$ min, faire la lecture de l'échantillon 1 et à $t = 12$ min, faire la lecture de l'échantillon 2

Les résultats sont exprimés en ppm (partie par million) par la lecture directe sur le spectrophotomètre à une longueur d'onde de 540 nm avec le facteur 1,37. On fait la moyenne des résultats des deux échantillons.

7. Dosage de l'amertume

- **Principe :**

L'absorbance du moût et de la bière est mesurée à la longueur d'onde de 275 nm. L'amertume obtenue sera exprimée en unité d'amertume (UA). Sachant que 1 UA = 1 mg/l.

- **Matériels :** Iso-octane pur ; HCl 6N ; tubes à essai ; pipettes ; agitateur magnétique ; cuvette en quartz ; spectrophotomètre.

- **Mode opératoire :**

L'échantillon doit être dégazé pendant 10 minutes avec l'agitateur magnétique. Puis dans un flacon on ajoute 0,5 ml HCl 6N ; 10 ml iso- octane et 5 ml de bière dégazée. Agiter vigoureusement pendant 8 à 10 minutes, puis laisser reposer pendant 15 minutes à l'obscurité.

Fixer la longueur d'onde du spectrophotomètre à 275 nm, avec le facteur 50. Avant toute analyse, employer le blanc (iso- octane) et appuyer sur la touche auto blanc afin d'obtenir une lecture de 0,000.

Expression des résultats : Amertume (UA) = lecture direct sur le spectrophotomètre.

8. Dosage des polyphénols

Les polyphénols sont dosés par la méthode de BISHOP.

- **Principe :**

Traitement de l'échantillon par une solution de carboxyméthylcellulose et d'EDTA. Réaction des polyphénols avec les ions ferriques en solution alcaline. Mesure de l'absorbance à 600nm par rapport à un essai à blanc.

- **Matériels** : Solution CMC/EDTA ; réactif ferrique ; solution ammoniacal ; eau distillée ; cuvette en verre ; pipettes ; tubes à essai, chronomètre ; spectrophotomètre.

- **Mode opératoire** :

- Pour le blanc :

Mettre 10 ml de moût (ou bière dégazée) dans une fiole jaugée de 25 ml ; introduire 8ml de CMC/EDTA et agiter ; ajouter 0,5 ml d'ammoniaque ; ajuster au trait de jauge avec l'eau distillée

- Pour l'échantillon :

Mettre 10 ml de moût dans une fiole jaugée de 25 ml ; Introduire 8 ml de CMC/EDTA et agiter ; Ajouter 0,5 ml de citrate ferrique et 0,5 ml de solution ammoniacale et agiter ; Ajuster au trait de jauge avec l'eau distillée ; Laisser reposer 10 minutes à température ambiante.

Lire l'absorbance des échantillons à une longueur d'onde de 600 nm avec le facteur 820 contre le blanc

Expression des résultats : $DO \times 820 = \text{polyphénols}$ en ppm dans le moût (ou la bière).

9. Dosage du taux d'alcool

- **Principe** :

Le taux d'alcool dans le moût et la bière est déterminé à l'aide d'un alcoomètre qui est un dispositif nouvellement développé FermentoFlash dont le principe est basé sur les méthodes de mesure thermo-analytique combinés avec des algorithmes mathématiques. L'échantillon de bière est aspiré dans les cellules de mesure au moyen d'une pompe. La teneur en alcool est mesurée à l'aide d'effets de mesure thermique.

- **Matériels** : Bécher ; alcoomètre

- **Mode opératoire** :

Prélever environ 100 ml d'échantillon à analyser ; plonger la sonde de l'alcoomètre dans l'échantillon ; appuyer sur la touche « entrer » : un échantillon est aspiré à l'aide d'une pompe. La lecture se fait automatiquement et les résultats s'affichent sur l'écran de l'appareil (en % vol)



Figure 18 : Alcoomètre FermentoFlash

10. Température et Pression

La température(°C) : on prend la valeur sur l'écran dans la salle de contrôle ou sur le box de contrôle ;

La pression (bar) : on prend la valeur sur l'écran dans la salle de contrôle ou sur l'aiguille de tank de fermentation ;

11. Contrôle de CO₂

Dans l'industrie de la bière, la qualité du gaz carbonique (CO₂) est décisive pour la qualité et le goût. Le CO₂ est contrôlé à deux niveau :

a. Contrôle de la pureté de CO₂ produit au cours de la fermentation :

La pureté du CO₂ est mesurée à l'aide du testeur de pureté CO₂ type CPT dont le principe est fondé sur l'absorption du gaz CO₂ par une solution caustique (Soude caustique).

- **Matériels :** NaOH 30% ; tuyau en caoutchouc ; testeur de pureté de CO₂

- **Mode opératoire :**

La burette graduée de mesure du CPT est inondée de façon adéquate avec le gaz CO_2 sous la pression atmosphérique. Une fois l'échantillon de CO_2 enfermé dans la burette, la solution caustique est remplie dans la burette de mesure en fermant l'alimentation en gaz et en ouvrant le robinet relié au réservoir de la soude. Contrairement aux autres gaz restants, le CO_2 réagit avec la soude. Le CO_2 est entièrement absorbé par la solution caustique et le volume de gaz restant sera sous forme d'une bulle de taille constante et sera lu sur l'échelle graduée de la burette, après que la burette a été placée verticalement. La contamination peut être lue en % v/v sur la burette de mesure.

Le CO_2 pur est récupéré et liquéfié. Il peut être utilisé à des fins commerciales ou à subvenir aux besoins en dioxyde de carbone dans la brasserie.

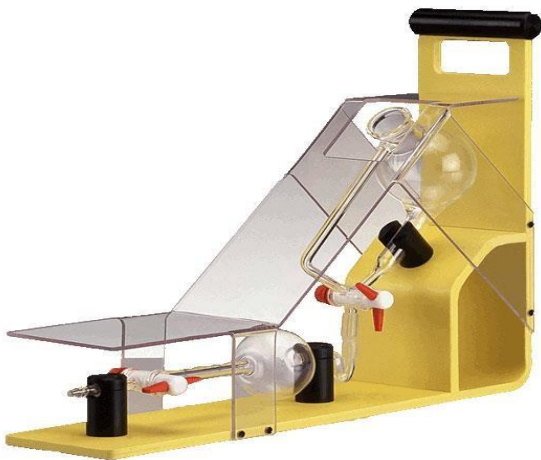


Figure 19 : Testeur de pureté de CO_2 type CPT

b. Mesure de la teneur en dioxyde de carbone (CO_2 dissout) dans le moût :

- **Principe :**

La mesure du dioxyde de carbone CO_2 est basée sur la loi de Henry, qui décrit l'équilibre entre un gaz et un liquide dans un espace clos. Cette loi stipule qu'à température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans le liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide. Il est donc possible de mesurer la quantité du CO_2 dissous dans un échantillon de liquide en mesurant à la fois la pression d'équilibre du CO_2 au-dessus du liquide et la température du liquide. La concentration est calculée à l'aide de la formule du CO_2 .

- **Matériels :** Tuyau en caoutchouc pour la connexion ; CO₂-mètre.
- **Mode opératoire :**

Purger l'appareil de mesure de CO₂ afin de libérer l'eau et de remplir le réservoir avec de la bière ; laisser couler la bière pendant 15 à 30 secondes ; fermer les robinets d'entrée et de sortie de la bière ; lire la concentration de CO₂ dans la bière en g/l.



Figure 20 : CO₂/O₂ mètre (CO₂- mètre / Oxymètre)

12. Contrôle de l'oxygène dissous

- **Principe:**

La mesure de l'oxygène dissous s'appuie sur la mesure de la luminescence d'une couche sensible au taux d'oxygène. La fluorescence change en fonction de la pression d'oxygène partielle. La quantité de gaz dissous dans le liquide est calculée à l'aide de la pression d'oxygène partielle et de la température.

- **Matériels :** Tuyau en caoutchouc pour la connexion ; oxymètre
- **Mode opératoire :**

Purger l'oxymètre (Figure 18) pendant 15 à 30 secondes ; diminuer le débit de sortie de la bière ; attendre la stabilité de la valeur ; lire la concentration en O₂ dissous dans la bière en g/l ou en ppm.

13. Dosage de calcium

- **Principe:**

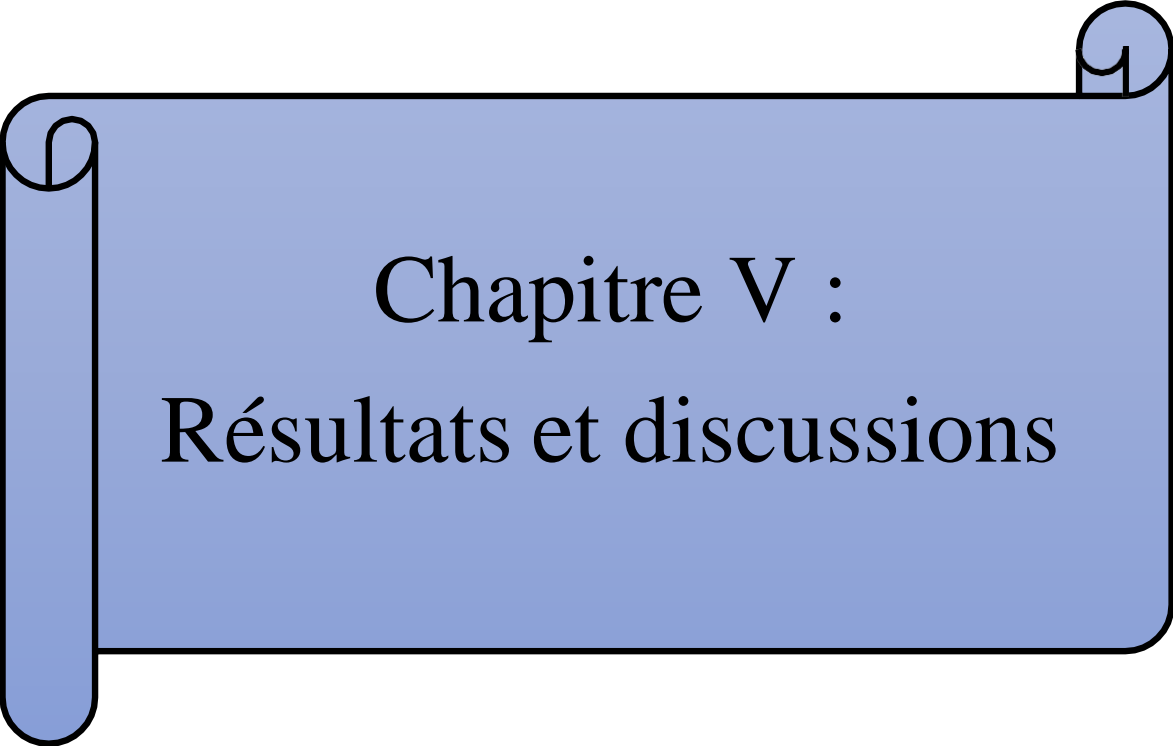
Titration des ions calcium avec une solution de sel disodique de l'acide éthylène-diamine-tétracétique (EDTA) à pH compris entre 12 et 13. L'acide calcéone carboxylique (réactif de Patton et Reeder ou calcon), qui donne une couleur rouge violet avec le calcium, est utilisé comme indicateur. Le magnésium est précipité sous forme d'hydroxyde et n'interfère pas lors du dosage.

- **Matériels :** Hydroxyde de potassium 8N ; EDTA 0,01M ; eau distillée ; acide calcéone carboxylique (calcon) ; burette de titration en verre ; fiole conique, spatule.

- **Mode opératoire :**

Introduire 10 ml d'échantillon dans une fiole conique de 250 ml contenant 100 ml d'eau distillée ; ajouter 3 ml de solution de potasse KOH 8N ; ajouter une pincée de calcon. La solution se colore en rouge violet en cas de présence de calcium ; doser immédiatement à l'aide de la solution d'EDTA 0,01M en agitant constamment. Verser rapidement l'EDTA au début du dosage, puis lentement vers la fin. Ajouter goutte à goutte la solution d'EDTA dès que la couleur de la solution commence à virer du rose ou rouge vineux au gris-bleu ou gris-vert. Le point final du virage est atteint lorsque la dernière nuance rouge a disparu. La couleur ne doit pas changer par addition d'une goutte supplémentaire de la solution.

Résultats : soit « N » le nombre de ml d'EDTA versés pour le virage : Calcium en ppm = $N \times 40,08$ sans décimale.



Chapitre V :
Résultats et discussions

V. 1. La cinétique de la fermentation

Le dénombrement des cellules de levure en fonction du temps permet de tracer la courbe en figure

21.

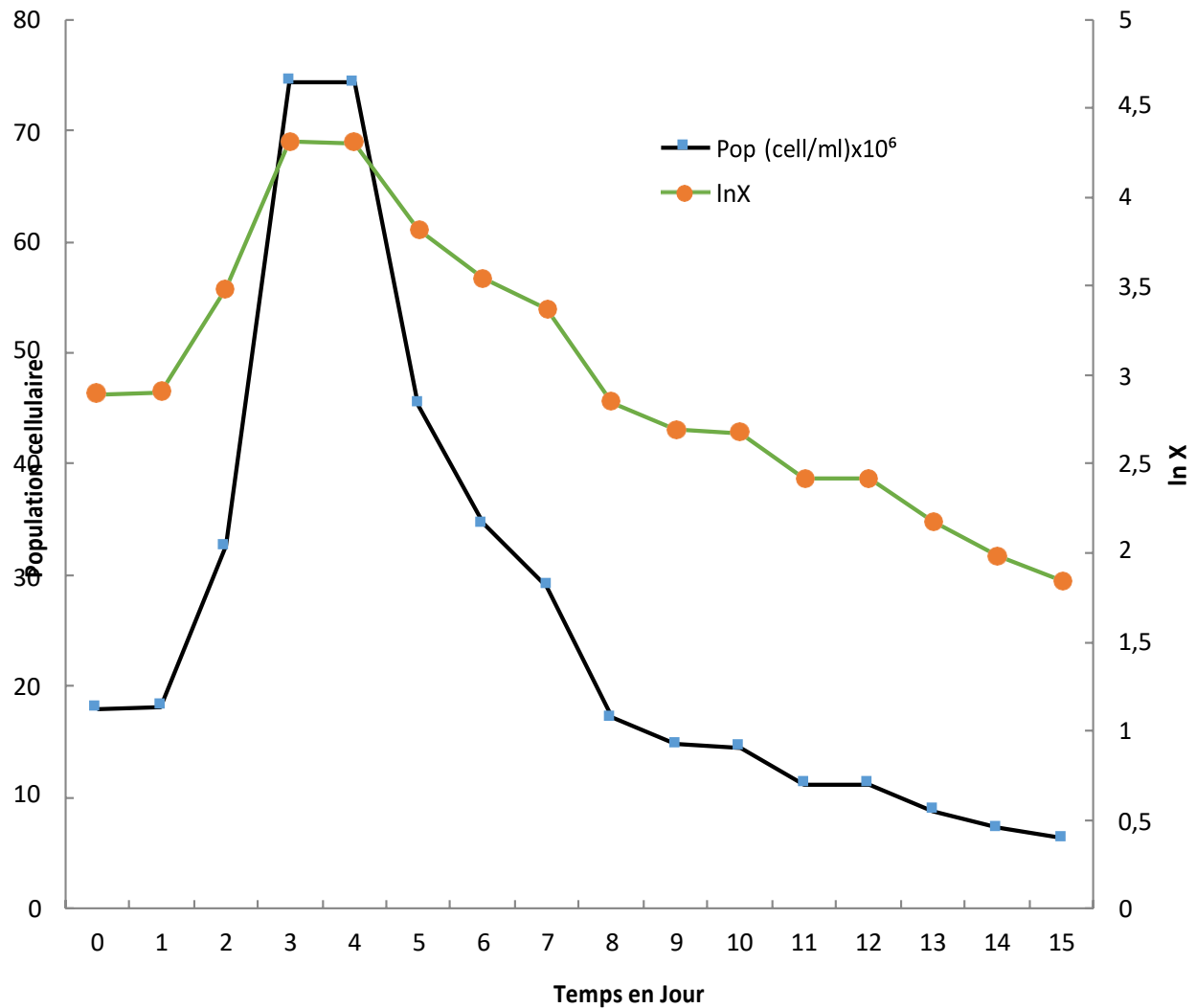


Figure 21 : courbe de croissance la levure et ln x en fonction du temps

Nous constatons que la population en levure augmente en fonction du temps, nous ne pouvons distinguer que 4 phases ;

- La phase de latence : c'est une période d'adaptation caractérisée par l'absence d'augmentation immédiate de la biomasse

- La phase de croissance : c'est une phase où les cellules augmentent progressivement atteignant $74,40 \times 10^6$ cell/ml le 3ème jour. Il y a en moyenne 4 fois plus de cellules qu'à l'ensemencement.
- La phase stationnaire : le nombre total des cellules reste constant. Les cellules sont en pleine activité fermentaire. Cette phase résulte du manque voire de l'épuisement des éléments nutritifs.
- La phase de déclin : correspond à la diminution de la biomasse liée à une lyse cellulaire, mais aussi à la floculation des cellules suite aux conditions de température et pression défavorables. Les cellules vont par la suite sédimenter au fond de la cuve.

En traçant le \ln de la population de levure en fonction du temps, nous pouvons délimiter la phase exponentielle qui correspond à l'intervalle [2 à 3j]

En prenant les deux points de la phase exponentielle, nous pouvons calculer le taux de croissance qui est :

$$\mu = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{t_2 - t_1}$$
$$\mu = 0,034 \text{ h}^{-1}$$

Le temps de génération est déduit de l'équation précédente $t_g = 20\text{h}$

V.2. Evolution du CO₂ dissous, du taux d'alcool et du pH

L'évolution du CO₂ dissous, du taux d'alcool produit et du pH est illustrée dans la figure ci-dessous.

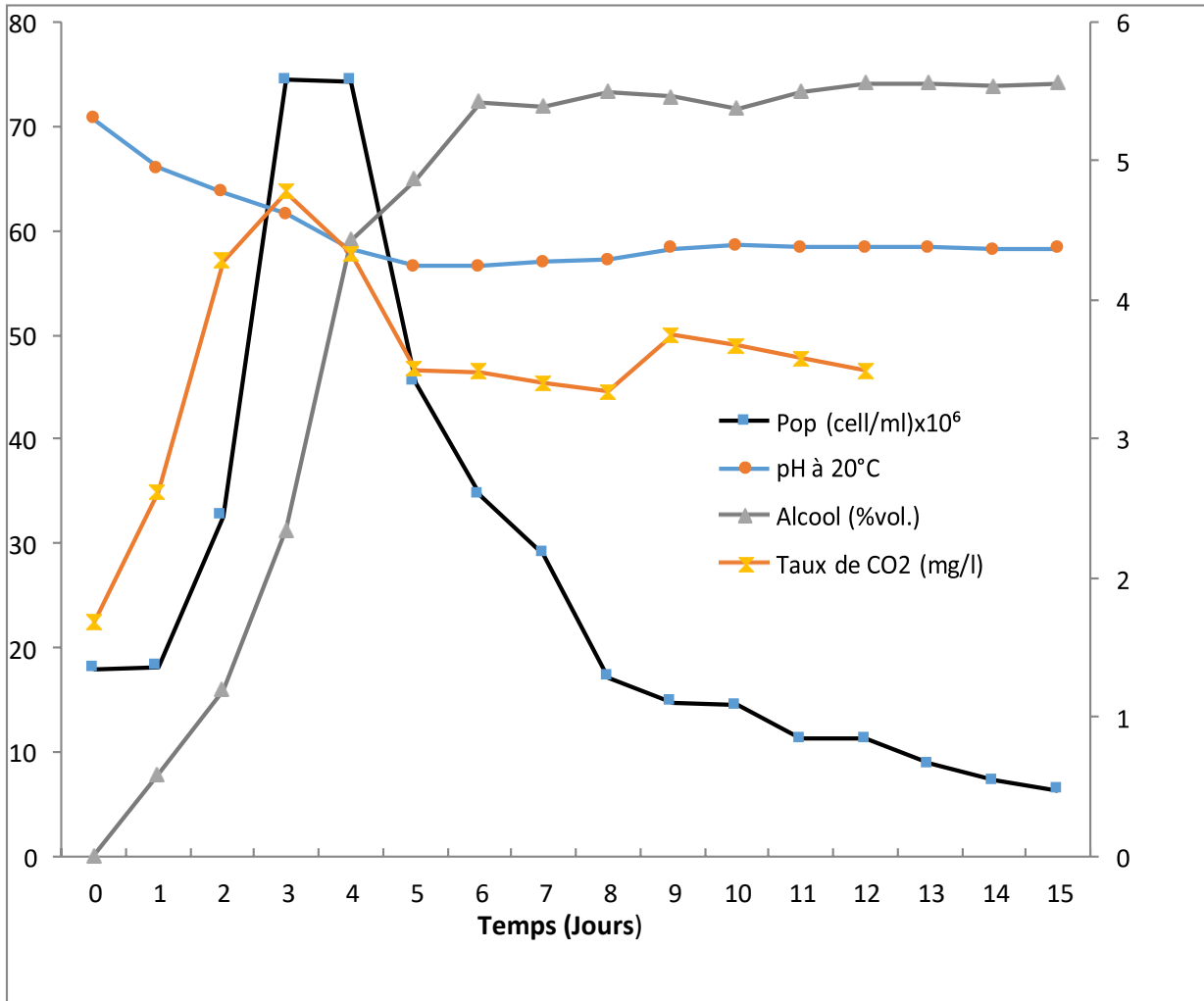


Figure 22 : Comparaison de la croissance à l'évolution du CO₂ dissous, du taux d'éthanol et du pH au cours de la fermentation

V.2.1. Evolution du CO₂ dissous

La production de CO₂ débute avec l'accroissement cellulaire, elle augmente progressivement et atteint le maximum au troisième jour de fermentation (figure 22). En effet, la vitesse maximale de production de CO₂ gaz est atteinte à la fin de la phase de multiplication des levures.

Par ailleurs, le taux de CO₂ dissous présent initialement dans le moût est de l'ordre de 1,68 mg/l provenant de l'eau de process. A partir des résultats obtenus (figure 24), on remarque une augmentation progressive du taux de CO₂ dissous jusqu'au 3^{ème} jour où il atteint son pic (4,78 mg/l). Ce qui est expliqué par le fait que la quantité du CO₂ dissous dépend de la vitesse de dégagement du CO₂ gaz. Par la suite, cette vitesse diminue car les levures perdent leur activité en raison de la présence de plus en plus importante d'éthanol dans le milieu. Ce qui explique une légère diminution du CO₂ dissous après cette phase. La récupération du CO₂ gaz (3^{ème} jour) est aussi à l'origine de cette diminution.

Une légère augmentation est aussi remarquée à partir du 8^{ème} jour, ce qui est dû à l'effet de la pression. En effet, la pression joue un grand rôle dans la dissolution du CO₂ dans le moût.

V.2.2. Evolution du taux d'éthanol

Selon les résultats (figure 22), il y'a eu une augmentation graduelle de la production d'alcool (éthanol) pendant la fermentation primaire. Ceci est dû à la production excessive de la levure qui est en phase exponentielle, ceci d'une part, et d'autre part à la diminution notable de l'extrait du moût. Cette production a effectivement atteint à partir du 6^{ème} jour une valeur de 5,42 % vol. A la fin de la fermentation principale, la teneur en alcool a tendance à se stabiliser et cela est à l'origine de l'épuisement des sucres fermentescibles et au phénomène de la toxicité intracellulaire du produit lui-même.

La teneur en alcool reste pratiquement stable tout au long de la fermentation secondaire (pendant la garde) dû à la faible teneur des cellules de levures et à l'épuisement des sucres fermentescibles.

Selon CAMPBELL (2008), l'effet évident de la fermentation alcoolique est la production d'éthanol (alcool) et du dioxyde de carbone (CO₂). Les levures métabolisent les sucres fermentescibles dans le milieu et produisent le CO₂ et l'éthanol.

V.2.3. Evolution du pH

Selon la tendance de la courbe (figure 22), il ressort que le pH décroît légèrement lors de la fermentation primaire (de 5,30 à 4,24). Par la suite, on remarque une légère augmentation à partir du 7^{ème} jour qui finira par se stabiliser à la fin de la fermentation.

En effet, THOMAS *et al.*, (2002) ont rapporté que lors de la fermentation, une baisse de pH est observée suite à une production d'acides organiques essentiellement l'acide pyruvique. La présence du CO₂ et de l'éthanol produits est aussi à l'origine de cette baisse car ils acidifient le milieu.

Une légère augmentation de pH constatée, peut être expliquée par le phénomène d'autolyse des cellules de levure, causée par un état de stress suite à une augmentation de la pression et à l'épuisement des nutriments (sucres fermentescibles).

V.3. Evolution de la densité du moût et des teneurs en polyphénols totaux et calcium

L'évolution de la densité du moût et des teneurs en polyphénols totaux et en calcium est représentée dans la figure 23.

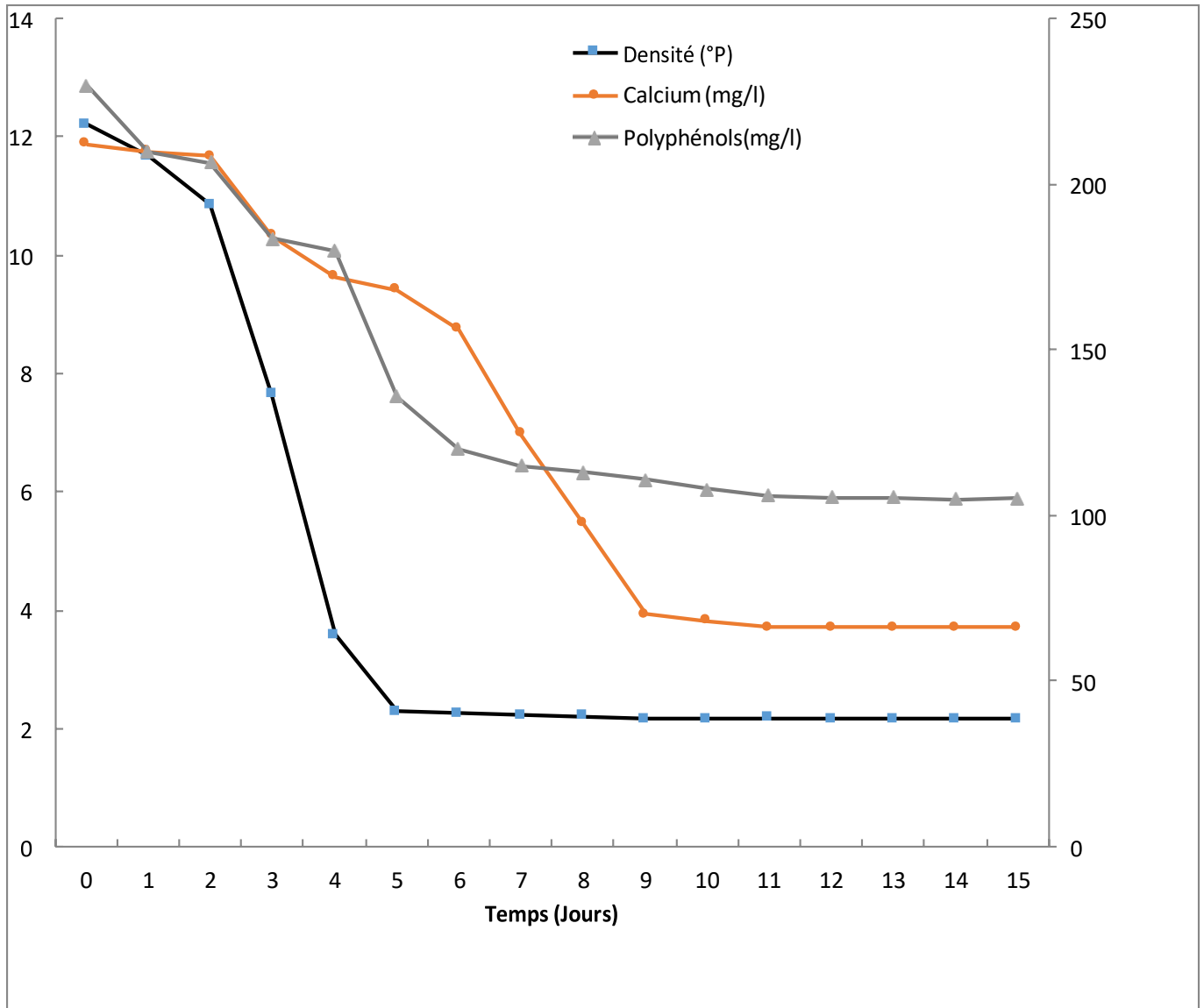


Figure 23 : Evolution de la densité du moût, des polyphénols et du calcium au cours de la fermentation

V. 3.1. Evolution de la densité du moût

Au cours de la fermentation, la densité du moût diminue plus ou moins vite entre le 1^{er} et 2^{ème} jour, puis avec une plus grande vitesse du 3^{ème} au 4^{ème} jour et se stabilise à partir du 5^{ème} au 15^{ème} jour (figure 23). La diminution de la densité au cours de la fermentation primaire indique une bonne consommation des substrats (sucres fermentescibles) par la levure pour sa croissance et la production de métabolites comme l'éthanol et le dioxyde de carbone.

En effet, Nedovic *et al.*, 2005 ont rapporté que la levure mise en culture dans des conditions de milieu convenables consomme les composés du milieu pour entrer dans sa phase exponentielle de croissance et provoque une diminution de la densité du moût.

On peut calculer la vitesse maximale de consommation du substrat à l'aide de la formule suivante : $V =$

$$-d(S)/dt \quad \longleftrightarrow \quad V = (3,58 - 7,65)/24 \text{ h}$$

$$V = 0,169 \text{ } ^\circ\text{P/h}$$

V.3.2. Evolution de la teneur en polyphénols totaux

Avant la fermentation, la concentration des polyphénols dans le moût était de l'ordre de 230 mg/l provenant des enveloppes des grains de malt et du houblon. D'après les résultats (figure 23), on constate que la teneur en polyphénols diminue progressivement et atteint une valeur de 110 mg/l à la fin de la fermentation principale. On remarque également qu'au cours de la fermentation secondaire, la teneur en polyphénols reste plus au moins stable.

Cette diminution de polyphénols totaux est expliquée par le fait que pendant la fermentation les polyphénols diffusent à partir de leurs cellules de stockage et subissent une oxydation pour devenir des composés quinoniques qui s'associent à d'autres flavanols et anthocyanes pour former des tannins condensés de masse moléculaire élevée, ils sont essentiellement insolubles (Nazaruddin *et al.*, 2006 ; Oracz *et al.*, 2015).

La précipitation de protéines avec les composés phénoliques peut être également à l'origine d'une perte non négligeable des polyphénols au cours de la fermentation.

V.3.3. Evolution de la teneur en calcium

Le calcium est un des oligo-éléments important utilisé par la levure pour son métabolisme . L'évolution du calcium au cours de la fermentation se traduit par une baisse générale de la quantité du calcium et se stabilise vers la fin (figure 23). Les causes de la baisse du calcium sont les suivantes :

- La précipitation sous forme des sels insolubles : le calcium peut précipiter sous forme des sels insolubles pendant la fermentation. Cela se produit lorsque le pH de la bière diminue en raison de l'activité des levures. A des niveaux de pH plus bas, le calcium peut se combiner avec d'autres composés tels que les phosphates pour former des sels insolubles qui se déposent au fond du fermenteur.
- Le calcium peut également former des complexes avec d'autres substances présentes dans le moût de la bière telle que les protéines ou les acides organiques. Ces complexes peuvent être moins solubles et entraîner une diminution de la concentration du calcium dans la bière.
- Le calcium aide à promouvoir la floculation des levures par la neutralisation des charges présentes à la surface des levures ce qui conduit à leur agrégation et la sédimentation.
- L'activation des enzymes. Rees et Stewart G.G, (1998) affirme que le calcium est essentiel à l'activité de l'amylase.

V.4. Détermination de quelques paramètres liés à la production de la bière

V.4.1. Evolution du diacétyl et de la turbidité

Les mesures quotidiennes de la quantité de diacétyl présente et de la turbidité du moût nous ont permis de mettre en évidence leur évolution au cours de la fermentation. Les résultats sont illustrés dans la figure 24 ci-dessous.

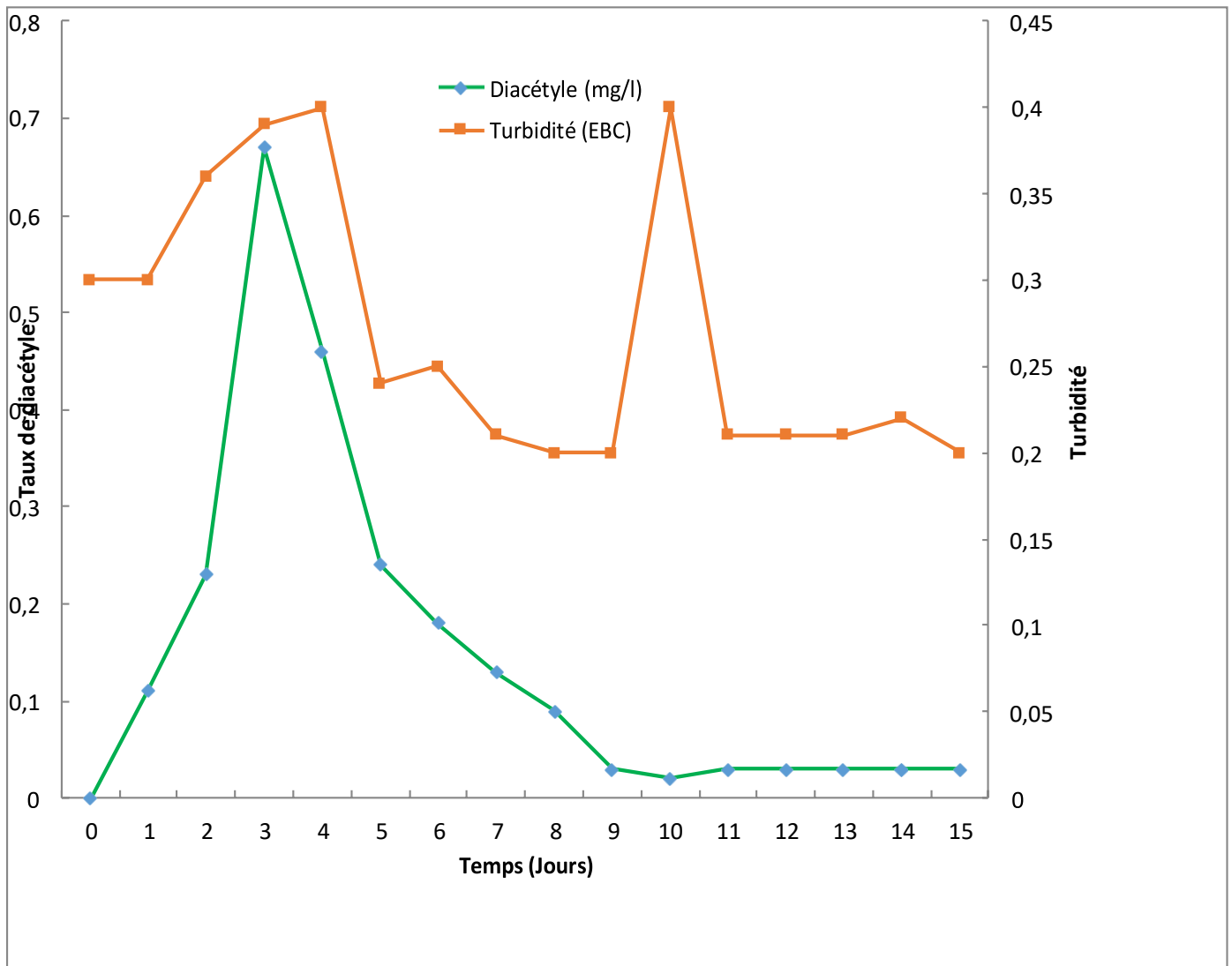


Figure 24 : Evolution du diacétyl et de la turbidité au cours de la fermentation

V.4.1.1. Evolution du diacétyle

Le diacétyle est un composé du groupe des cétones produit par la levure lors de la fermentation. On retrouve ce composé organique notamment dans le beurre, la crème fraîche et les boissons comme la bière et le vin (Lodolo *et al.*, 2008). Sa présence dans la bière est plutôt synonyme de faux-goût décelable par une odeur de beurre, du popcorn ou du caramel. La concentration en diacétyle apparaît normalement tôt lors du déroulement de la fermentation. Cette concentration est ensuite réduite quand la levure assimile le diacétyle et le convertit par la voie enzymatique en acétoine, qui à son tour est ensuite métabolisée en 2,3 butanediol. Le diacétyle est probablement un sous-produit de la biosynthèse des acides aminés, dont l'un des précurseurs formés : acétolactate est à l'origine de sa biosynthèse.

On peut remarquer à partir des résultats de la figure 24, une absence de diacétyle à la fin de l'entonnement. La concentration en diacétyle dans le moût apparaît dès le début de fermentation aboutissant à une valeur de 0,11 mg/l, après seulement un jour de fermentation.

Le point culminant de formation du diacétyle est atteint après 2 à 3 jours de fermentation (0,67 mg/l au 3^{ème} jour) puis commence à décroître régulièrement à partir du 4^{ème} jour pour atteindre une valeur de 0,03 mg/l à la fin de la fermentation primaire.

La concentration élevée est expliquée par la diminution des sucres fermentescibles et une activité maximale de la levure d'où une concentration en diacétyle proportionnelle à la multiplication de la levure et à l'épuisement des sucres fermentescibles. A cette période, les conditions de température et de pression du milieu sont favorables pour l'activité de la levure. La décroissance régulière du diacétyle est due à l'augmentation de la température à 15°C qui permet de hâter la réduction finale des sucres fermentescibles et du diacétyle (Lodolo *et al.*,2008).

V.4.1.2. La turbidité

A partir des résultats de la figure 24, on constate une légère augmentation de la turbidité durant les 4 premiers jours de la fermentation dû à la réaction des protéines et des polyphénols. Le résultat de ces réactions seront des molécules de poids moléculaire élevé (macromolécules) qui vont par la suite sédimenter au fond de la cuve. Ce qui explique la baisse régulière de la turbidité

à partir du 5^{ème} jour de fermentation. La diminution de la densité du milieu joue aussi un grand rôle dans la baisse de la turbidité. En effet, plus le moût est dense, plus il est trouble.

Une augmentation de la turbidité est remarquée au 10^{ème} jour, ce qui est dû au refroidissement du milieu (trouble à froid). Cette forme de trouble ne pose généralement pas de problème.

V.4.2. Evolution de l'amertume et de la couleur

Les résultats de l'évolution de l'amertume et de la couleur au cours de la fermentation sont présentés dans le graphe ci-dessous :

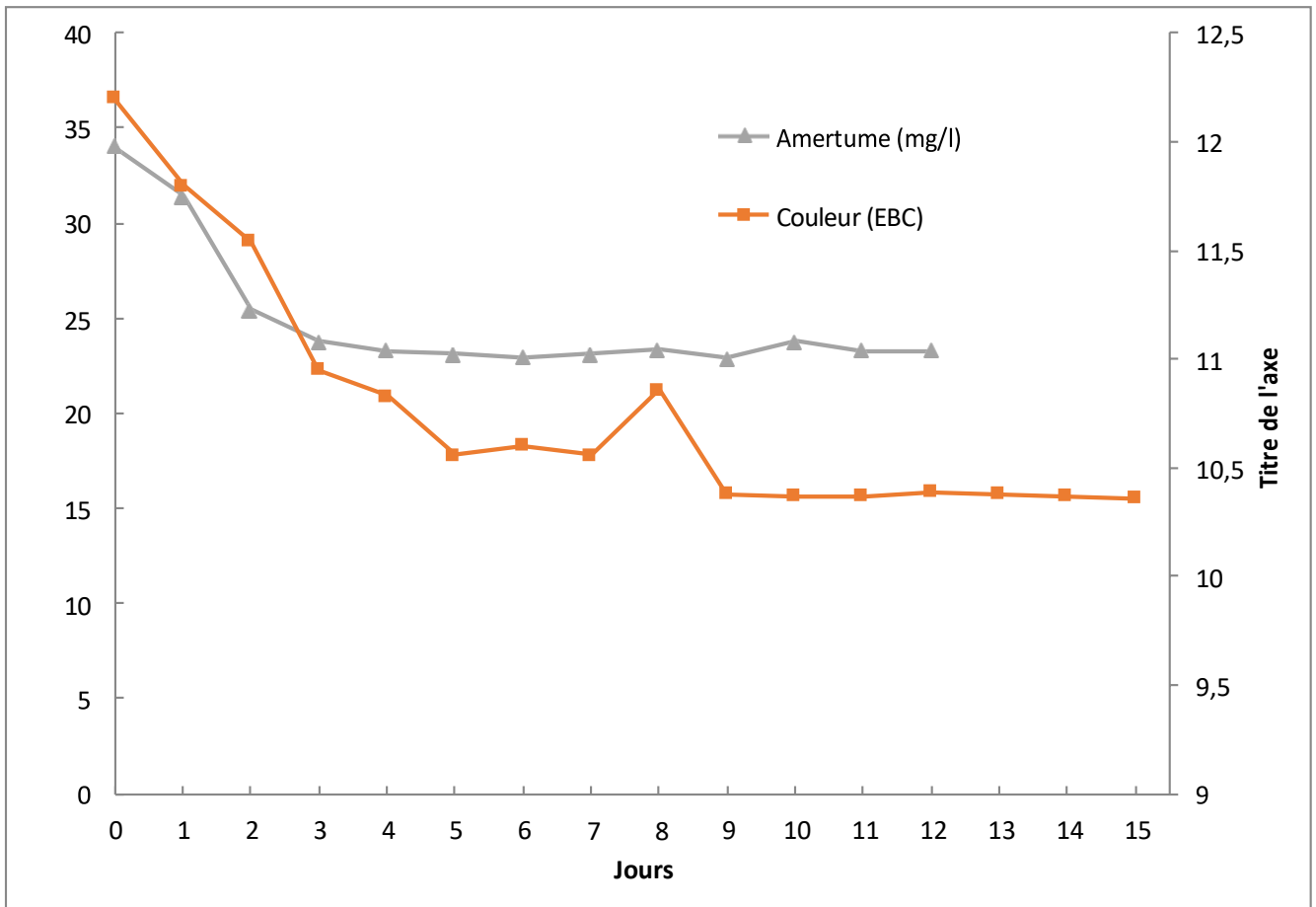


Figure 25 : Evolution de l'amertume et de la couleur au cours de la fermentation

V.4.2.1. L'amertume

L'évolution de l'amertume suit généralement une tendance baissière du début jusqu'à la fin de la fermentation comme le renseigne la figure 25. Les facteurs qui abaissent le taux d'amertume pendant la fermentation sont les suivants :

- L'isomérisation des acides alpha : l'amertume dans la bière provient principalement des acides alpha contenus dans le houblon. Pendant l'ébullition du moût, les acides alpha subissent une isomérisation chimique pour devenir des composés amers. Cependant, pendant la fermentation, certains de ces composés amers peuvent être dégradés par les enzymes de la levure à l'instar des estérases qui peuvent dégrader l'acide iso-alpha-acide. Ces estérases catalysent la rupture des liaisons esters, réduisant ainsi la perception des composés amers.
- La perte des substances amérisantes lors de la formation de la couche des mousses pendant les 18 premières heures de la fermentation.
- Selon Laws *et al.*,1972, l'augmentation du taux d'alcool est une des causes qui induit à une baisse de la quantité des substances amérisantes (acides alpha, iso alpha). Cette baisse est due à la solubilité de ces substances dans l'éthanol.
- Dobrinas *et al.*,2013 rapporte que les molécules des acides alpha adhèrent à la paroi des levures, ce qui favorise la floculation des levures.

V.4.2.2. La couleur

Les résultats de la figure 25 montrent que l'intensité de la couleur du moût diminue au fur et à mesure de la fermentation primaire et varie mais reste proche de la stabilité pendant la fermentation secondaire.

Selon SHELLHAMER (2009), les pigments responsables de la couleur de la bière peuvent être absorbés sur les parois des cellules de la levure ce qui peut conduire à la diminution de l'intensité de la couleur de la bière. Ces observations sont en accord avec la croissance importante de la population cellulaire.

En outre, la réduction de l'intensité de la couleur pourrait être attribué à la dégradation de pigment colorés essentiellement les mellanoïdines formés par les réactions de Mallaird au cours des étapes de maltage et de brassage.

GORISTEIN *et al.*, (2000) ont démontré que la dégradation de la couleur de la bière est due au changement de la teneur en acides aminés dans le moût puisque ces mellanoïdines sont obtenus par condensation des acides aminés et des sucres.

V.4.3. Evolution de l'oxygène dissous

Les mesures du taux d'oxygène dissous ont permis de mettre en évidence son évolution au cours de la fermentation.

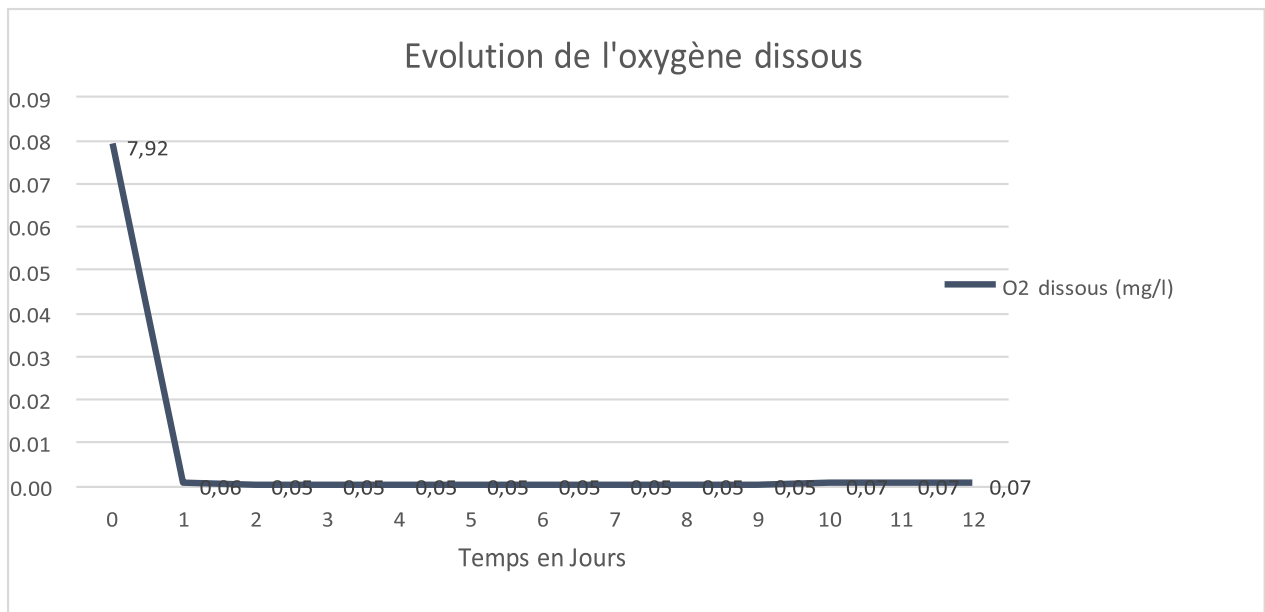


Figure 26 : Evolution de l'oxygène dissous

A partir de ces résultats, on remarque que les valeurs initiales d'oxygène apportées par l'aération du moût sont comprises entre 7,83 et 8 mg/l en fin d'entonnement et sont très vite utilisés après seulement quelques heures.

La diminution excessive du taux d'oxygène dissous est dû au fait que les levures réalisent une respiration cellulaire dans un premier temps pour leur croissance. En effet, en présence d'oxygène les levures favorisent le métabolisme respiratoire : les systèmes enzymatiques impliqués dans les réactions d'oxydation sont les plus actifs en ce moment-là (effet Pasteur). Par contre, en absence

d'oxygène les systèmes enzymatiques sont inhibés et donc moins actifs, la levure se tournera à la fermentation (effet Crabtree).

Selon Fornaison- Bonnefond *et al.*, 2002 ; la fonction principale de l'oxygène est de permettre la synthèse lipidique. Il va être utilisé par la levure pour synthétiser des acides gras saturés et des stérols. Ces composés sont utiles à la levure car ils permettent une meilleure résistance de la membrane à l'éthanol.

Les polyphénols jouent aussi un grand rôle dans la diminution du taux d'oxygène dissout. En effet, les polyphénols ont une capacité de fixer l'oxygène et donc réduisent les quantités d'oxygène dans le moût en début de fermentation, conduisant ainsi à une diminution des risques d'oxydation des composés facilement oxydables.

V.5. Température et Pression

Pour réaliser une bonne fermentation, des contrôles de température et de pression sont obligatoirement effectués.

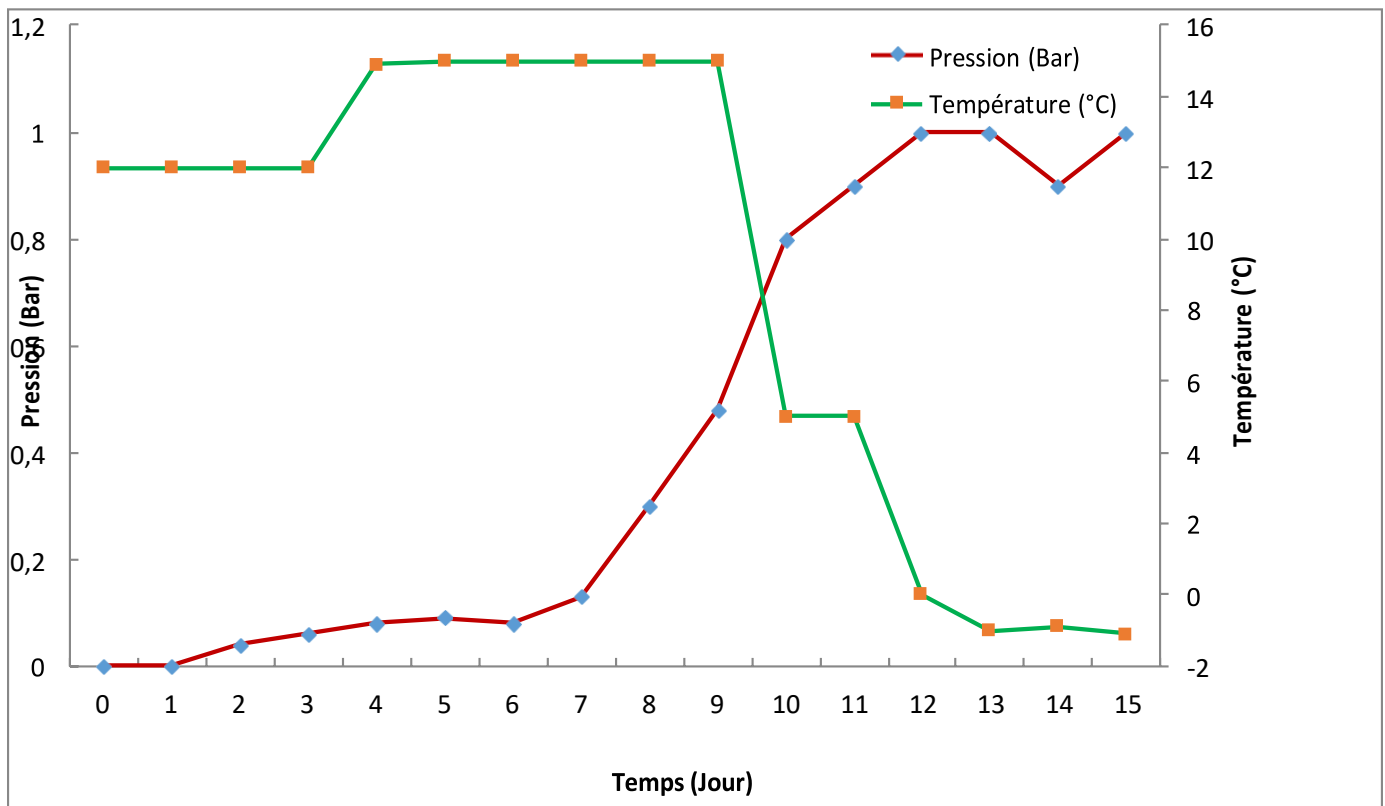


Figure 27 : Effet de la température et de la pression sur le déroulement de la fermentation

Au début la température d'entrée du moût est de 12°C avec une densité moyenne de 12,22 °P. A ce stade, la levure réalise d'abord un métabolisme respiratoire pour sa croissance.

Au 3ème et 4ème Jour, la température est maintenue à 12°C jusqu'à la fin de la période de croissance alors que la densité diminue progressivement. On aura une production des métabolites primaires (éthanol et CO₂). Au 5ème jour, à la fin de la phase de croissance des levures, on augmente la température à 15°C pour faciliter la transformation de l'acétolactate en diacétyl (Lodolo et al., 2008). Parallèlement, la pression est augmentée légèrement pour permettre la saturation du moût en CO₂. La température est maintenue à 15°C jusqu'au 8ème jour afin de favoriser la réduction du diacétyl produit en 2,3 butanediol à flaveur inactive. Au 9ème jour, en générale après 48h à 15°C le diacétyl est réduit, on refroidit progressivement le Tank de fermentation jusqu'à atteindre 5°C le 11ème jour. Le refroidissement relativement lent permet de compléter la réduction du diacétyl et d'éviter une excrétion de protéases par la levure ce qui serait néfaste à la stabilité de la mousse. Au 12ème jour, on refroidit le tank à 1°C. A partir du 13ème jour, la température est de -1°C, ce qui permet la stabilité colloïdale de la bière et donc le raffinage.



Conclusion

CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif de suivre la fermentation et les paramètres physico-chimiques au cours de la production de la bière, dans le souci de produire une bière saine, nutritive et de bonne qualité, répondant aux besoins des consommateurs.

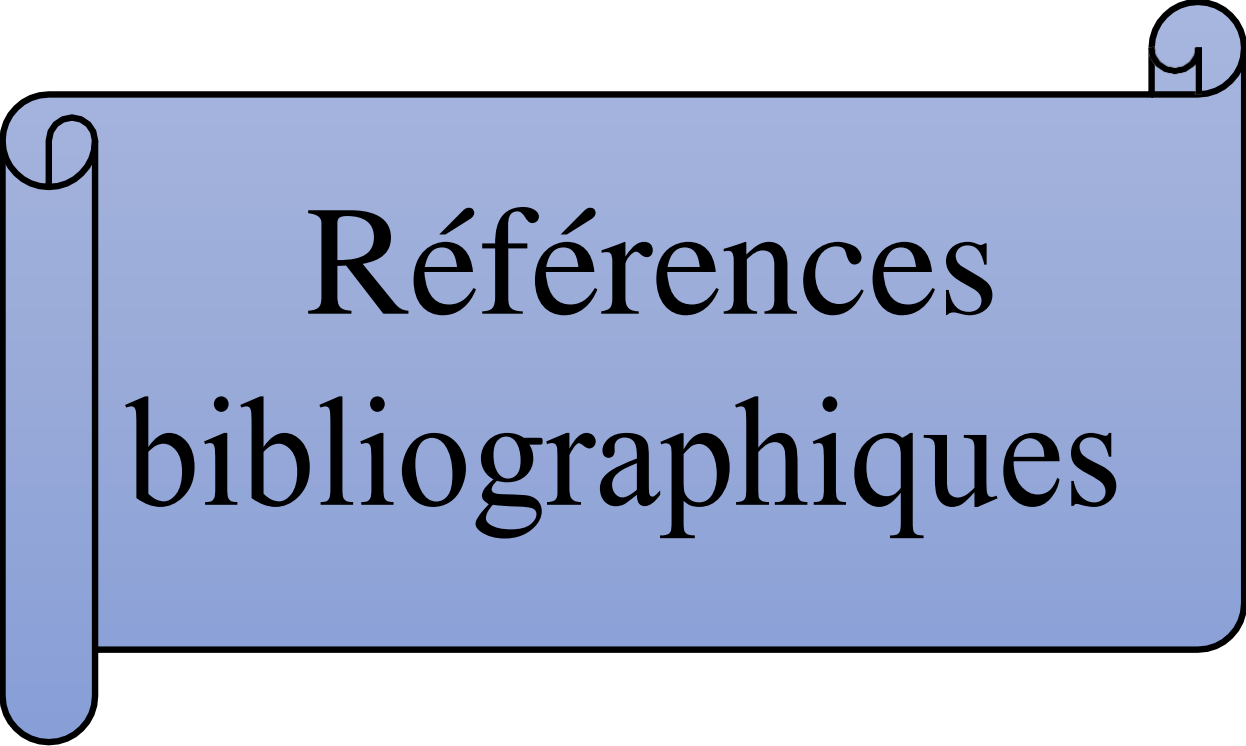
En effet, le suivi a été effectué au sein de la brasserie star d'Algérie, où nous avons eu à faire un contrôle quotidien des paramètres physico-chimiques au cours de la fermentation. Les paramètres tels que la densité, la population levurienne, l'amertume, le diacétyle, pH et divers autres paramètres sont des indicateurs, du bon ou mauvais déroulement de la formation de la bière dans le fermenteur et permettent de contrôler et guider la fermentation, d'apporter des actions correctrices nécessaires pour l'obtention d'un produit possédant des caractéristiques souhaitées.

Il a été constaté que les résultats des paramètres contrôlés se trouvaient dans la fourchette des normes établies par l'entreprise (en fonction de la souche de levure utilisée), signe d'une bière de bonne qualité. La densité du moût diminuait au fur et à mesure du déroulement de la fermentation passant de 12°P à 2,2°P, synonyme d'une consommation des sucres fermentescibles (substrat) par la levure *Saccharomyces cerevisiae* qui vont par la suite se transformer en alcool, CO₂, et composés organiques utiles à la formation de la bière. On observait en même temps l'évolution de la population levurienne qui était très faible au cours de la phase de latence, suivie d'une multiplication accrue des cellules au cours de la phase de croissance passant de 18,20 millions à 74 millions /ml. Il s'en suivait une phase stationnaire au cours de laquelle les levures se stabilisent puis chutent en phase de déclin.

La température jouait le rôle de guide la fermentation en favorisant l'activité des levures, la réduction du diacétyle, (responsable du goût de beurre, altérant la qualité organoleptique du produit), la floculation des levures et la maturation de la bière. L'amertume qui est l'une des caractéristiques organoleptiques importante de la bière diminuait au cours de la fermentation, passant de 34 mg /l à 23,23 mg suite à l'adhérence des substances amérisantes à la paroi des levures, de la perte des substances amérisantes contenues dans le couche des mousses en début de fermentation.

Toutefois, certaines techniques peuvent-être utilisée dans le but d'améliorer et contrôler la fermentation, la qualité de la bière produite à l'instar de la technologie d'immobilisation et

d'utilisation d'enzymes telles que l'alpha-acetolactate décarboxylase pour limiter la concentration finale du diacétyle. Certaines études suggèrent la récupération de la couche de mousse formée en début de fermentation. Cette récupération devrait présenter un réel avantage en termes d'amélioration à l'échelle commerciale, d'utilisation et de régularité de l'amertume (en cas de perte d'amertume).



Références
bibliographiques

Références bibliographiques

Alain Ly, Chemseddine Chelbi et Gabriel Ray : Biochimie de la bière. Elève en TS2 du lycée François-Villon (2003-2004)

Baker D.A, Kirsop B.H.1972.A rapid procedure for reducing the diacetyl content of beer, the journal of the institute of brewing,79:43-44

Bandriamanana B. Z., 2012. Proposition d'une méthodologie du suivi de brassage dans la fabrication de la bière de mangue Skol, cas de la nouvelle brasserie de Madagascar à Ambatolampy. Mémoire de fin d'étude. Université d'ANTANANARIVO

Beer and Health, moderate consumption as part of a hearty lifestyle, The Brewers of Europe (ed), 5ème édition, 2016

Benoît J. : Bières et brasseries d'ici et d'ailleurs. Granulat secondaire : Déchets de l'Industrie extractive, Version du 26 Juin 2021

Campbell L., (2008). Yeast and fermentation whisky: Technology, Production and Marketing. ISBN 0-12-6692

Cohen Zineb (2011), Réalisation du tableau de bord pour les machines du conditionnement au sein de BRANOMA, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah-Fès. Faculté des sciences et technologies, P 14. [En ligne]

De Jouffroy d'Abrans Isabelle, Cidre-Bière et autres boissons familiales Paris 1977

Diaz-Ruiz R., 2010. Participation du fructose 1,6-biphosphate dans l'induction de l'effet Crabtree chez *Saccharomyces cerevisiae*. Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Sciences de la vie et de la santé. Bordeaux.

Doumbaye Djimadoumngar (Février 1991), Etude de l'évolution des taux de diacétyle et l'oxygène dissous au cours de la fabrication de la bière à la BRAKINA (BOBO-DIOULASSO) [en ligne]

Duran-Sanchez A. Rio-rama M.D.C., Alvarez-GARCIA J., &Oliveira C.2022.sage open,21582440221108154

Faure L., 2005. Homéostasie cellulaire chez *Saccharomyces cerevisiae*. Etude des effets des acides faibles. Thèse de Doctorat, Univ. Toulouse, Pp 27.

Gibson R.B. 2011. 125th anniversary review: improvement of higher gravity brewery via wort enrichment and supplementation, the journal of the institute of brewing, 117:259-267

Goemaere, Louis et Mousseau, 2016. Secret de brasseurs. La plage

Goristein S., Caspi A., Zemser M., et Trakhtenbiere S., (2000). Comparative contents of some phenolics in beer, red and white wines, Nutr. Res, 20, pp 131-139

Gros J., Tran T. J. H., et Collin S.: Enzymatic release of odourant 2013, polyfunctional thiols from cysteine conjugates in hop. J. Inst. Brew. (19 : 21-27, 2013)

Houblon de brasserie. N.d. <http://www.bières-du-monde.fr/houblons-de-brasserie/5191-houblon-nelson-sauvin-pellet.html>, accessed April 7, 2023

Jawich D, 2006. Etude de la toxicité de pesticides vis-à-vis de deux genres de levures : approche cinétique et moléculaire. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. Pp 134

Kabre Wendpanga Pierre, 2014. Suivi de l'évolution de la population levurienne au cours de la fabrication de la bière à la BRAKINA. Mémoire de fin d'étude à l'Université de Bobo-Dioulasso [En ligne]

Kang Q., Sun J., Wang B., & Sun B. 2023. wine, beer and Chinese Baiju in relation to cardiovascular health: the impact of moderate drinking, food science and human wellness 12:1-13

Keyn et Hough J., 1971. Revue annuelle de microbiologie, pp 5

Krogerus K., & Gibson B.R. 2013. Diacetyl and its control during fermentation, the journal of the institute of brewing, 119:86-97

La Bière, de la brasserie au verre. Petit Vade-mecum de la bière de sa fabrication à son service. Edité par l'Association Suisse des Brasseries (ASB), Décembre 2017

Laws D.R. McGuinness J. D, &RENNIE H.1972.The losses of bitter substances during fermentation, the journal of the institute of brewing ,78:314-321

Lodolo E.J., Kock J.L.F., Axell B.C. et Brooks M., 2008. The yeast *Saccharomyces cerevisiae*-the main character in beer brezing, FEMS yeast research, 8: 1018-1036

Marc Faiveley, stratégies de fermentation appliquées aux boissons 2009, Techniques de l'Ingénieur

Mildren, 2014. Brewing Water Résidual Alkalinity and mash PHLas Vegas

Nazaruddin R., Seng L. K., Hassan O., Said M., 2006. Effect of pulp preconditioning on the content of polyphenols in cacao beans (*Theobroma cacao*) during fermentation. Ind. Crops. Prod. 24,87,94.

Nduka Okafor. 2007.Modern industrial microbiology and biotechnology, Edition sciences publishers, Enfield, NH, USA,523p

Nedovic V., Leskosek-Cukalovic I., Bezbradica D., Obradovic D. et Bugarski B. (2005). New porous matrices and procedures for yeast cell immobilization for primary beer fermentation. Proceedings of the European Brewing Convention Congress, Prague, Fachverlag Hans Carl: Nürnberg, Germany, Contribution 48.

Oracz J., Zyzelewicz D., Ewa Nebesny E., 2015. Effects of an aqueous extract of cocoa on nitric axide production of macrophages activated by lipopolysaccharide and interferon. Nutrition. 19. 681. 685

Pascal C., 2011. La fermentation. Opération Unitaires en génie biologique. Collection dirigée par Joël Cnokaert- IA IPR Biochimie-Génie biologique François Guillet- IGEN Biotechnologies et secteur médico-social

Pascal charbonnat. 2009.La notion de fermentation en chimie et en histoire naturelle au 18ième siècle : le statut métaphysique de la matière et l'origine des êtres vivants, Hal open science

Pigeon Alexandre, 2017. Fabrication de la bière. <http://www.alexandrepigeon.ca/recherches-eau-html>, accessed March 20,2023

Popescu V., Soceanu A., Dobrinas S., & Stanciu G. 2013. A study of beer bitterness loss during the various stage of Romanian beer production beer, the journal of the institute of brewing, 119:111 - 115

Rees E.M. R, & Stewart G.G. 1997. The effects of increased magnesium and calcium concentration on yeast fermentation performance in high gravity worts, the journal of the institute of brewing, 103:287-291

Rees E.M. R, & Stewart G.G. 1999. Effects of magnesium, calcium and wort oxygenation on the fermentive performance of ale and lager strains fermenting normal and high gravity worts, the journal of the institute of brewing , 105:211-217

Salanta L.C., Coldea T.E., Ignat M.V, pop C.K., Tofana M., Mudira E., Borsa A., Pasqualone A., Anjos O., & Zhao H. 2020. Functionality of special beers processes and potential health benefits, processes, 8(12), 1613

Schonberger C., & Kostecky T. 2011. 125th anniversary review, the journal of the institute of brewing, 117:259-267

Shellhamer TH., (2009). Beer color, Beer: A Quality perspective. Academic Press; New York. Chapitre 7

Thomas K. C., Hynes S. H. et Ingledéz W. M., (2002). Influence of medium buffering capacity on inhibition of *Saccharomyces cerevisiae* growth by acetic and lactic acids. Appl. Environ. Microbiol. (68), pp 1616-1623

Voet D., Voet J. G., 2005. Biochimie. 2ème ED. Edition De Boeck, Pp 837. Bruxelles

Winemak-in : le réseau des professionnels de l'œnologie, la nutrition des levures publiée le 20 Janvier 2014



Annexes

Tableau VIII : Résultats de contrôle des paramètres physico-chimique au cours de la fermentation

Jours	Date et heure	Densité (°P)	Pression (Bar)	Température (°C)	pH à 20°C	Couleur (EBC)	Turbidité (EBC)	Pop (cell/ml)x10 ⁶	Mortalité (%)	Calcium (mg/l)	Polyphénols(mg /l)	Amertume (mg/l)	Alcool (%vol.)	Taux de CO2 (mg/l)	O2 dissous (mg/l)	Diacétyle (mg/l)
0	28/04/2023 à 19h	12,22	0,00	12,00	5,30	12,20	0,30	18,00	4,64	212,10	230,00	34,00	0,00	1,68	7,92	0,00
1	29/04/2023 à 10h	11,67	0,00	12,00	4,95	11,80	0,30	18,20	4,54	210,00	210,00	31,42	0,59	2,62	0,06	0,11
2	30/04/2023 à 10h	10,85	0,04	12,00	4,78	11,54	0,36	32,60	2,43	208,41	206,50	25,46	1,20	4,28	0,05	0,23
3	01/05/2023 à 10h	7,65	0,06	12,00	4,62	10,95	0,39	74,40	1,34	184,36	183,70	23,76	2,35	4,78	0,05	0,67
4	02/05/2023 à 10h	3,58	0,08	14,90	4,36	10,83	0,40	74,30	1,21	172,00	180,00	23,29	4,43	4,33	0,05	0,46
5	03/05/2023 à 10h	2,28	0,09	15,00	4,24	10,56	0,24	45,40	0,88	168,00	136,00	23,12	4,87	3,50	0,05	0,24
6	04/05/2023 à 10h	2,25	0,08	15,00	4,24	10,60	0,25	34,60	2,89	156,30	120,00	22,98	5,42	3,48	0,05	0,18
7	05/05/2023 à 10h	2,22	0,13	15,00	4,27	10,56	0,21	29,00	1,37	124,56	115,00	23,11	5,39	3,40	0,05	0,13
8	06/05/2023 à 10h	2,20	0,30	15,00	4,29	10,86	0,20	17,20	1,16	97,73	113,00	23,34	5,50	3,34	0,05	0,09
9	07/05/2023 à 10h	2,16	0,48	15,00	4,37	10,38	0,20	14,80	1,35	70,25	110,90	22,90	5,46	3,75	0,05	0,03
10	08/05/2023 à 10h	2,16	0,80	5,00	4,39	10,37	0,40	14,50	0,90	68,13	107,90	23,79	5,38	3,67	0,07	0,02
11	09/05/2023 à 10h	2,17	0,90	5,00	4,38	10,37	0,21	11,20	1,78	66,13	106,00	23,29	5,50	3,58	0,07	0,03
12	10/05/2023 à 10h	2,16	1,00	0,00	4,38	10,39	0,21	11,20	1,78	66,13	105,40	23,31	5,56	3,49	0,07	0,03
13	11/05/2023 à 10h	2,16	1,00	-1,00	4,38	10,38	0,21	8,80	/	66,13	105,40	/	5,56	/	/	0,03
14	12/05/2023 à 10h	2,16	0,90	-0,90	4,36	10,37	0,22	7,24	/	66,13	104,83	/	5,54	/	/	0,03
15	13/05/2023 à 10h	2,16	1,00	-1,10	4,37	10,36	0,20	6,31	/	66,13	105,12	/	5,56	/	/	0,03

Préparation des réactifs et solutions

1. Solution d'EDTA 0,02N :

Dissoudre 3,7224g de poudre d'EDTA dans 1l d'eau distillée

2. Réactif ferrique :

Mettre 3,5 g de citrate ferrique ammoniacale vert (18% fer) dans 100ml d'eau distillée.

3. Solution CMC/EDTA :

Dissoudre lentement 10g de CMC avec 2g d'EDTA dans 500ml d'eau distillée, après dissolution complète (toute une nuit), transférer dans un ballon jaugé de 1000ml et ajuster au volume.

4. Solution d' α naphthol :

Dissoudre 5g d' α naphthol dans 100ml d'éthanol absolu.

5. Solution de créatine :

Dissoudre 200mg de créatine dans 50ml de KOH à 40%.

6. Solution d'éthanol à 10% :

Prélever 10ml d'éthanol et ajuster à 100ml avec de l'eau distillée

7. Hydroxyde de potassium (KOH) 8N :

Dissoudre 44,89g d'hydroxyde de potassium dans 100ml d'eau distillée

8. Acide chlorhydrique (HCl) 6N :

Diluer 500ml de HCl concentré 36%, dans 1000ml d'eau distillée

9. Ammoniaque $\frac{1}{2}$:

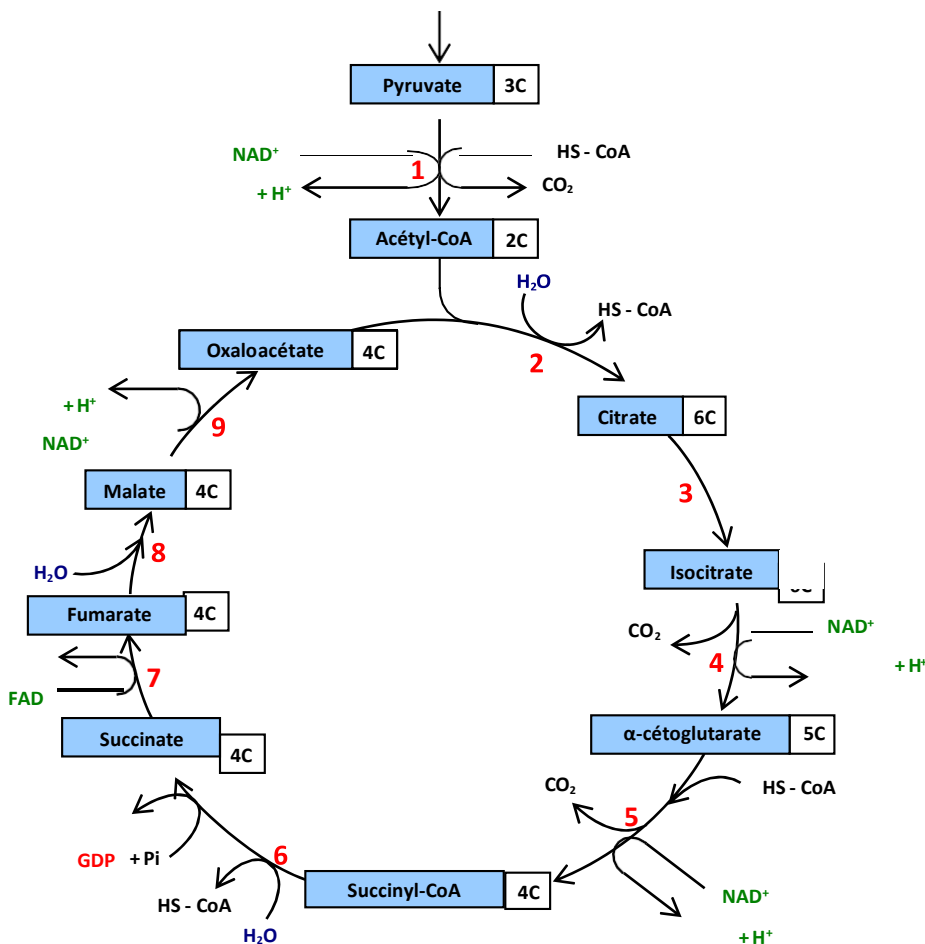
Mélanger 1 volume d'ammoniaque pur avec 1 volume d'eau distillée.

10. Phénolphtaléine 0,5% :

Dissoudre 0,5g de phénolphtaléine dans l'alcool 60°

L'alcool 60° se prépare en mélangeant 2 volumes d'alcool 90° + 1 volume d'eau distillée.

Cycle de l'acide citrique ou cycle de Krebs



Remarques :

- Le nombre d'atomes de carbone de chaque type de molécule est indiqué dans le cadre blanc.
- Chez les **végétaux** le **GDP** est remplacé par de l'ADP.

Enzymes impliquées

1. Pyruvate déshydrogénase
2. Citrate synthase
3. Aconitase
4. Isocitrate déshydrogénase
5. α -cétoglutarate déshydrogénase
6. Succinyl-CoA synthétase
7. Succinate déshydrogénase
8. Fumarase
9. Malate déshydrogénase

Noms des molécules

NAD^+ : nicotine adénine dinucléotide

FAD : flavine adénine dinucléotide

GDP : guanosine 5'-diphosphate

Équation bilan du cycle de Krebs à partir de l'acide pyruvique (= pyruvate)



Figure : Cycle de Krebs

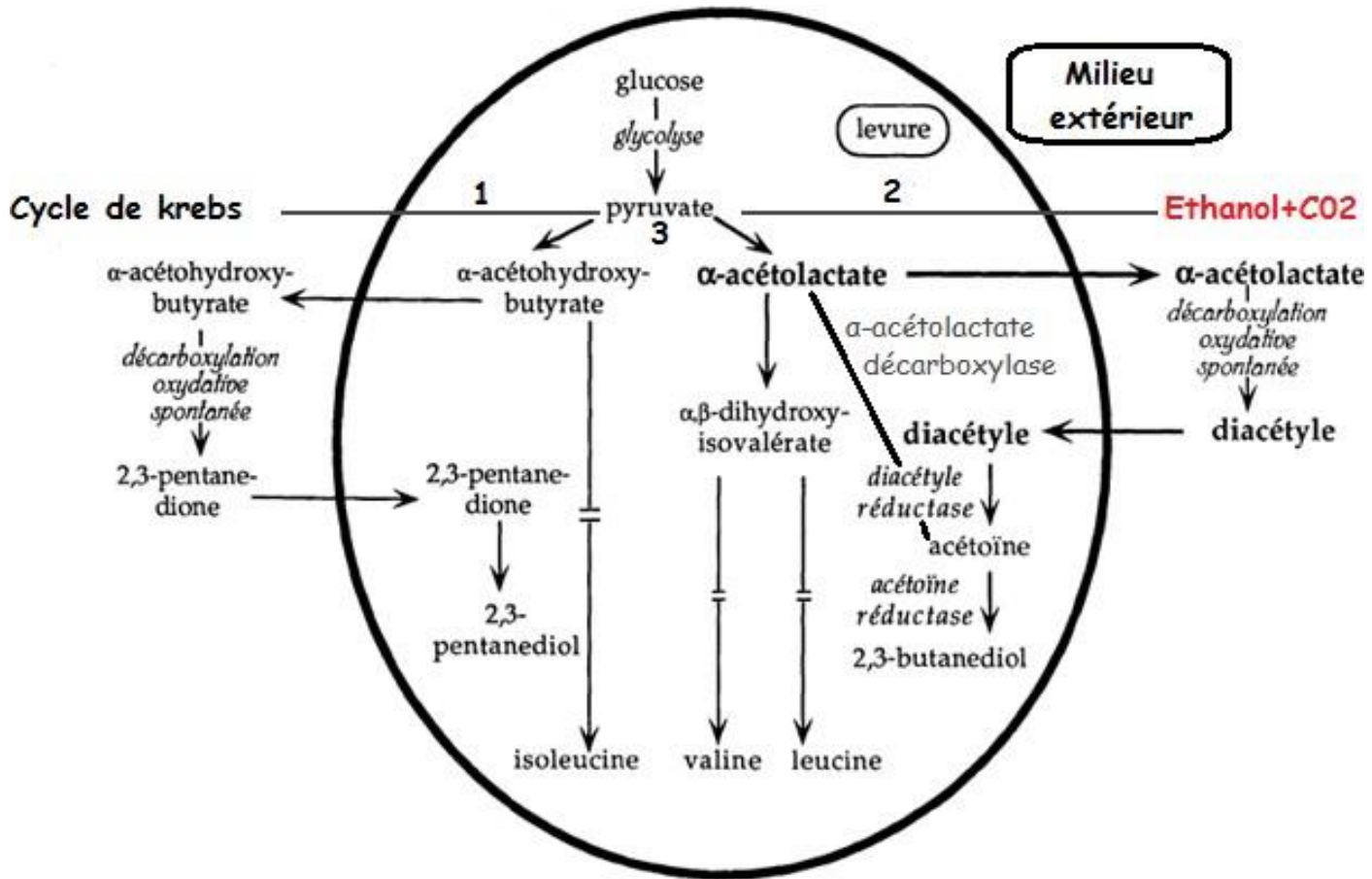


Figure : Métabolisme de la levure et formation de diacétyl

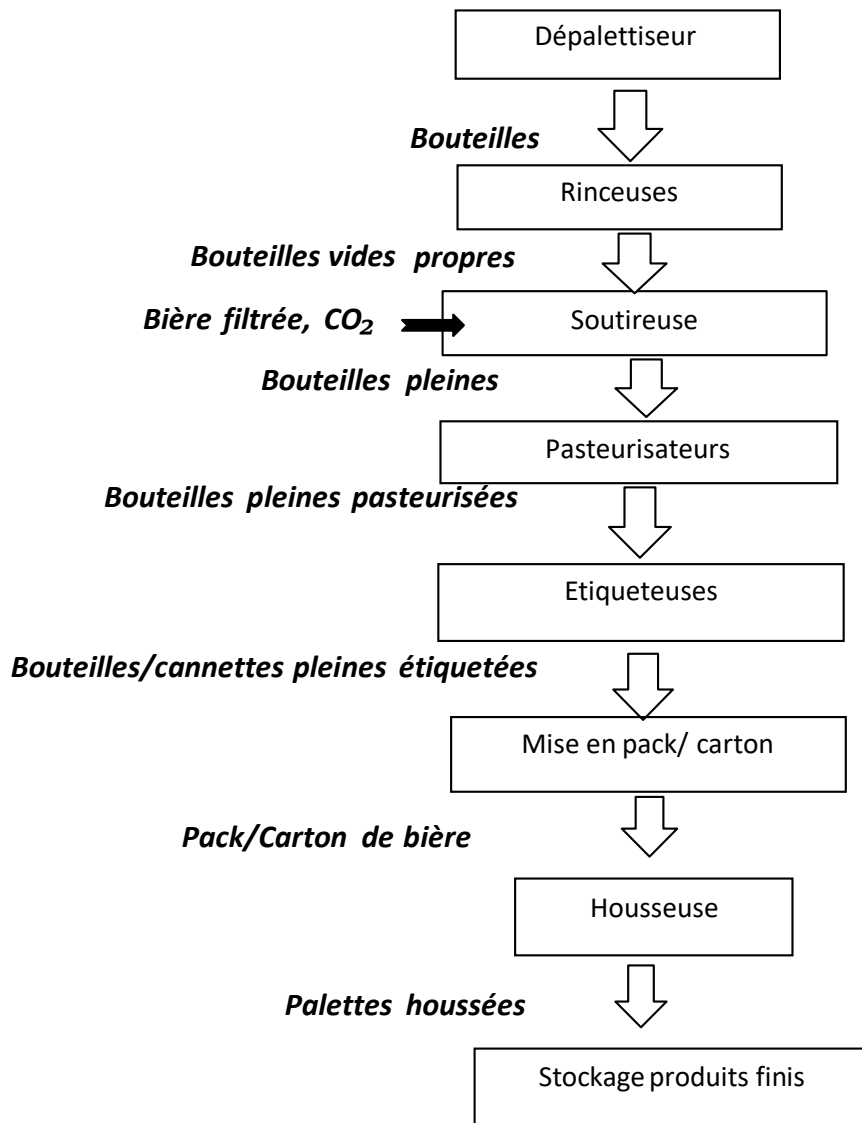


Figure 36 : Diagramme de conditionnement

Lexique de la dégustation

1. **Acreté** : amertume désagréable due parfois à la levure ou à des eaux trop alcalines.
2. **Acidité** : perception sur les côtés de la langue d'une acidité trop prononcée, causée par une contamination lactique.
3. **Alcool** : outre au cerveau, l'alcool se fera d'abord ressentir sur les gencives et dans le nez.
4. **Amertume** : une des 4 saveurs de base (avec le sucré, le salé et l'acide) perçue sur le dessus de la langue à l'arrière. (à mettre en relation avec la dose de houblon en cuve d'ébullition).
5. **Arôme** : ne pas confondre avec odeur (nez). L'arôme de la bière est décerné lorsque la bière est en bouche, par rétro olfaction.
6. **Astringence** : provenant des tannins. Sensation de contraction des muqueuses. A situer entre amertume et âcreté.
7. **Brillance** : qualifie la turbidité de la bière (clair, limpide, trouble).
8. **Couleur** : pigmentation de la bière pouvant varier du jaune au noir. Un bon contrôle de la couleur est à réaliser avec un fond blanc.
9. **Dégustation** : peut-être décomposée en plusieurs étapes d'analyses visuelles, olfactive, début en bouche, rétro olfactive (arôme), en bouche et l'arrière-goût.
10. **Diacétyle** : véritable traceur de la fermentation. Caractérisé par un seuil de perception très faible. Il donnera une odeur de beurre rance à la bière.
11. **Esters** : caractère fruité de la bière (acétate d'isoamyle=banane, hexanoate d'éthyle=pomme)
12. **Flaveur** : ensemble des qualités organoleptiques (odeur, goût, arôme).

13. **Houblonnage** : concerne l'odeur du houblon aromatique dans la bière.
14. **Levure** : le goût de levure provient de son autolyse qui est due à une dégénérescence ou à son âge mais aussi par une fermentation ou une garde trop chaude.
15. **Métallique** : nom générique qui qualifie la saveur d'un métal dans la bière.
16. **Mousse** : qualifiée par sa stabilité, consistance, son adhérence, épaisseur.
17. **Oxydation** : provoque une amertume plus forte à la bière mais moins fine aussi. Une bière oxydée a aussi un goût de carton (trans-2-nonéol) ou une odeur de moisi.
18. **Pasteurisation** : une trop forte pasteurisation provoque un goût de pain cuit.
19. **Pétillant** : concerne la saturation en CO₂ de la bière.
20. **Soufre** : produit naturel de la bière. Sa concentration doit cependant rester faible : Diméthyl sulfure (DMS) = saveur du maïs brûlé et de légume cuit.

Peut marquer un défaut de fermentation : H₂S = odeur de l'œuf pourri,

Mercaptans (thiols) = odeur de crotte de poule, d'égout.
21. **Seuil de perception** : concentration d'un composé à partir de laquelle celui-ci est détectable (au nez ou à la bouche).

Résumé

Une récolte d'orge destinée au pain, dévastée par la pluie, après germination et avec la levure naturellement présente, la bière était née. C'est en Europe de l'Ouest que la bière va se développer. Au X^{ème} siècle, des corporations de brasseurs voient le jour, créant ainsi une profession à part entière. L'évolution des technologies et le développement des recherches scientifiques sur les microorganismes ont participé à la maîtrise du processus de la fermentation alcoolique, et à l'amélioration des conditions sanitaires des brasseries.

L'objectif de notre travail est de suivre la fermentation et les paramètres physico-chimiques liés à la production de la bière. Nous avons réalisé notre stage pratique à la Brasserie Star d'Algérie. Le profil de fermentation a été déterminé en évaluant les variations du nombre de levure, le taux d'alcool, de la densité, du pH, de l'amertume, du dioxyde de carbone, du taux de diacétyl et bien d'autres. Ces paramètres sont des indicateurs, du bon ou mauvais déroulement de la formation de la bière, permettant ainsi de contrôler et guider la fermentation.

Les résultats recueillis montrent qu'ils sont conformes aux normes établis par l'entreprise et attestent de la qualité et de la conformité du produit fini. L'expertise technique et les compétences de l'entreprise ont été d'une importance capitale dans l'obtention du produit de haute qualité.

Mots clés : Bière ; Fermentation alcoolique ; Levure ; Paramètres physico-chimiques ; Processus de fabrication

ABSTRACT

A barley harvest for bread, devastated by rain, after germination and with the yeast naturally present, beer was born. It is in Western Europe that beer will develop. In the tenth century, brewers' guilds were born, creating a profession in its own right. The evolution of technology and the development of scientific research on microorganisms have contributed to the control of the process of alcoholic fermentation, and to the improvement of the sanitary conditions of breweries.

The objective of the study is to monitor fermentation and physico-chemical parameters related to beer production. We did our practical internship at the Star Brewery of Algeria. The fermentation profile was determined by evaluating variations in yeast number, alcohol content, density, pH, bitterness, carbon dioxide, diacetyl content and many others. These parameters are indicators of the good or bad progress of beer formation, thus allowing to control and guide the fermentation.

The results collected show that they comply with the standards established by the company and attest to the quality and conformity of the finished product. The technical expertise and skills of the company have been of principal importance in obtaining the high quality product.

Keywords: Beer; Alcoholic fermentation; Yeast; Physico-chemical parameters; Manufacturing process