



Année Universitaire : 2011-2012

Filière ingénieurs Industries Agricoles et Alimentaires



Rapport de stage PFE

Réduction du taux d'oxygène dissous dans la bière

Réalisé par:

ED-DRA Abdelaziz

Encadré par:

- FARAJ Hicham « BRANOMA »
- MELIANI Abdeslam « FST Fès »

Présenté le 22 Juin 2012 devant le jury composé de:

- Mr FARAJ Hicham
- P^r. MELIANI Abdeslam
- P^r. KANDRI RODI Adiba
- P^r. AMRANI Khalid
- P^r. CHADLI Noureddine
- P^r. KANDRI RODI Youssef

Stage effectué à : BRANOMA Fès



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : PRESENTATION

I) Présentation de la société « BRANOMA ».....3
II) Présentation de la bière et matières premières.....7

CHAPITRE II : FABRICATION DE LA BIÈRE

I) Le Maltage.....12
II) La Fabrication de la bière proprement dite.....14
 1) Le Brassage14
 2) La Fermentation20
 3) La Filtration23
 4) Le Soutirage.....23
 5) Pasteurisation.....24

CHAPITRE III : L'ORIGINE DE L'OXYGÈNE MOLECULAIRE DANS LA BIÈRE

1) L'oxygène.....27
2) Solubilité de l'oxygène dans l'eau, mout, Bière.....27
3) Contribution des matières premières et du procès sur la formation des réducteurs.....28
4) Absorption et réduction de l'oxygène de l'air au cours de la fabrication de la bière.....29

CHAPITRE IV : REDUCTION DU TAUX DES GAZES ETRANGERES DANS LE PRODUIT FINI

Introduction.....33
Méthodologie de travail.....33
I) Description de la problématique33
II) Evolution du taux d'oxygène dissous au cours de la fabrication de la bière.....34
 1) Matériels et méthodes.....34
 2) Suivi du taux d'oxygène au cours de la fabrication de la bière.....35
 3) L'interprétation des résultats.....37
III) Technique de soutirage.....39
IV) Détermination des facteurs influents39



1) Diagnostic par la méthode de brainstorming	39
2) Diagramme d'ISHIKAWA	40
V) Optimisation des facteurs et proposition des solutions.....	41
1) Diagramme de Pareto.....	41
1.1) Quantification des résultats	42
1.2) Traçage du diagramme.....	44
2) Plan d'expériences.....	45
2.1) Aperçu général.....	45
2.2) Choix des facteurs.....	46
2.3) Choix du plan d'expérience.....	46
2.4) Terminologie des plans d'expériences.....	47
2.5) Réalisation des essais.....	47
2.6) Traitement des résultats obtenus.....	49
 CONCLUSION GENERALE	 53
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 54



Introduction générale

Le secteur des industries agroalimentaires est l'un des piliers de l'économie marocaine, avec un chiffre d'affaires de plus de 60 milliards de dirhams, sa participation dans le PIB est de 4,4 %. Les boissons ont toujours constitué une part importante de ce secteur et essentiellement les boissons alcooliques tel que la bière.

La bière est la boisson fermentée la plus ancienne, et la plus consommée aujourd'hui. Tout en conservant la tradition, la filière s'efforce d'intégrer les progrès techniques et d'être à l'écoute des exigences du consommateur qui sont les deux éléments essentiels pour garantir sa pérennité.

Devant concilier à la fois maîtrise de la qualité et rentabilité, la filière aujourd'hui fortement industrialisée, utilise de plus en plus les outils techniques, marketing et commerciaux pour y parvenir.

C'est dans la perspective d'intégrer cet essor du secteur boissons marocain que j'ai effectué un stage de fin d'étude d'une durée de trois mois au sein de la société BRANOMA qui est un des pionniers de la production du bière au Maroc. Ce stage, effectué au sein de service production, m'a amené à faire face aux difficultés rencontrées par l'industriel pour produire un produit de qualité. Notre travail repose sur la réduction du taux des gaz étrangers dans le produit fini, qui est l'un des principaux facteurs d'oxydation de la bière. Afin de développer avec clarté les démarches mises en œuvre pour atteindre cet objectif, notre plan se subdivisera en trois axes principaux.

En premier lieu, je présenterai la société BRANOMA, plus précisément le site de Fès, lieu du déroulement du stage, et je procéderai à une présentation de la bière et de la matière première.

En second lieu, je présenterai le processus de fabrication de la bière. Nous verrons en détail le principe de différentes étapes de la fabrication de la bière, ainsi que l'origine et l'influence de l'oxygène dissous sur la qualité de la bière.

Enfin et après la réalisation d'un diagnostic du processus de fabrication je développerai un plan d'action pour réduire le taux des gaz étrangers dans le produit.



Chapitre I

Présentation



I) Présentation de la société BRANOMA

C'est une société Anonyme « S.A » qui se situe au quartier industriel Sidi Brahim Fès, ayant été créée en 1947 avec un capital de 50 000 000 DH. Elle participe dans un secteur actif, de l'Industrie Agroalimentaire qui représente 32% de la valeur ajoutée de l'ensemble des Industries de transformation.

L'activité principale de la société consiste à gérer et exploiter des unités industrielles qui permettent de conserver, traiter, transformer et distribuer des boissons alcooliques, tels que la bière.

Dans le cadre de son système qualité, BRANOMA s'engage dans une politique de qualité dont l'objectif principal est de satisfaire ses clients, d'être constamment à leur écoute et leur offrir des produits qui répondent le mieux à leur attente.

Afin d'améliorer ses performances, BRANOMA s'engage à la norme de qualité d'iso 22000 version 2005.

1) Historique de la société

EVENEMENT	DATE
Date de création	1947
Licence Heineken accordé à BRANOMA	1979
Arrêt de production des boissons gazeuses	1982
Arrêt de production de la Heineken	1990
Déménagement à la nouvelle usine	Fin 2004



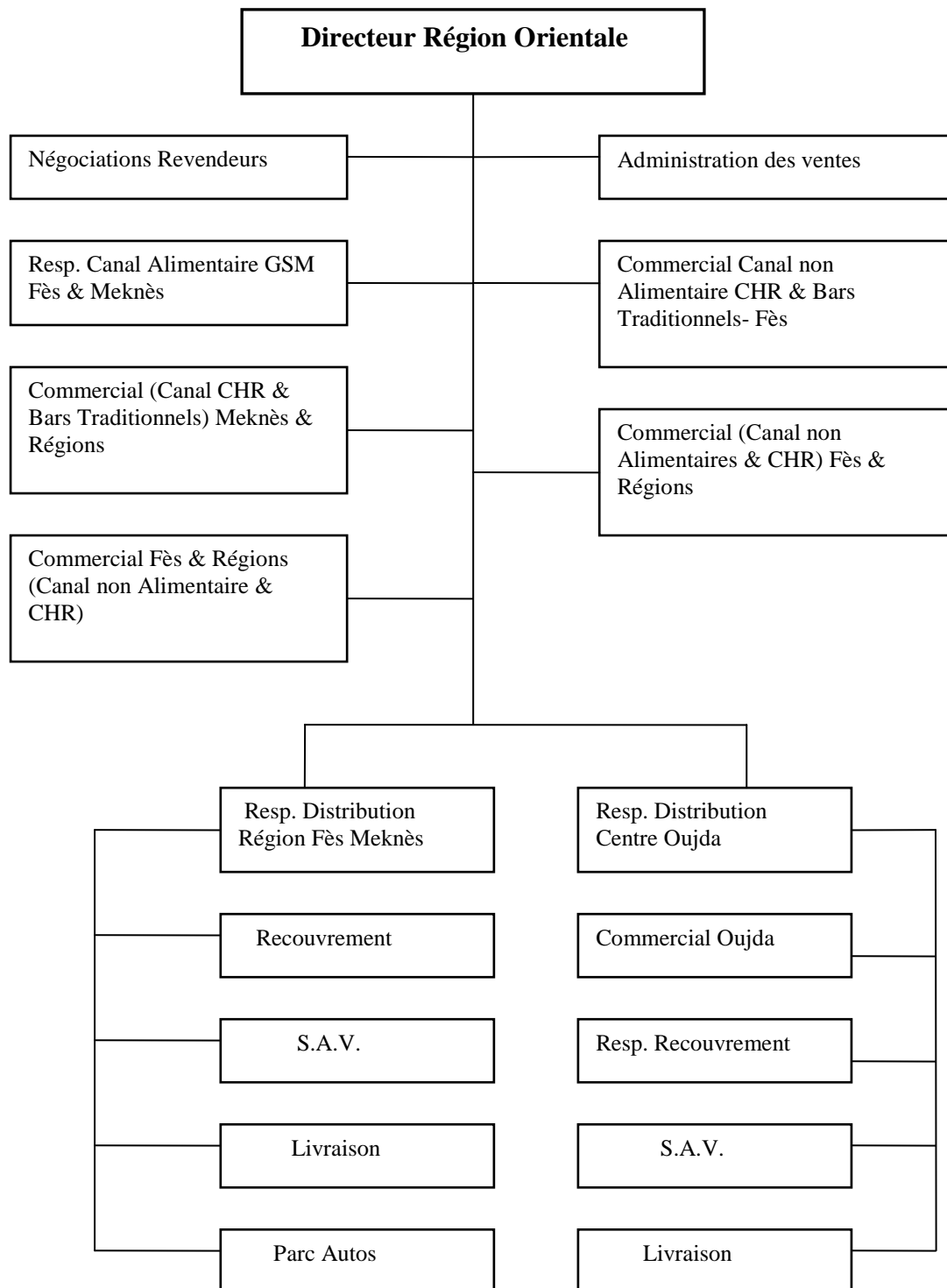
2) Informations générales

Raison sociale	Brasserie du Nord Marocain
Statut juridique	Société Anonyme (S.A).
Capital social	50 000 000 Dhs
Actionnariat	Société des Brasseries du Maroc et autres.
Adresse	Rue Ibn EL Khateb Sidi Brahim Quartier Industriel Fès BP 2100.
Date de mise en service	1947.
Effectifs	151
Capacité de production	200 000 HI/an
Surface totale	30500 m ²
Domaines d'activité	<ul style="list-style-type: none">✓ Fabrication, conditionnement de bière : Stork, Flag Spéciale.✓ Distribution des produits BRANOMA & SBM.
Champ de certification	Comprend les achats, la fabrication, le conditionnement, le stockage et la commercialisation.

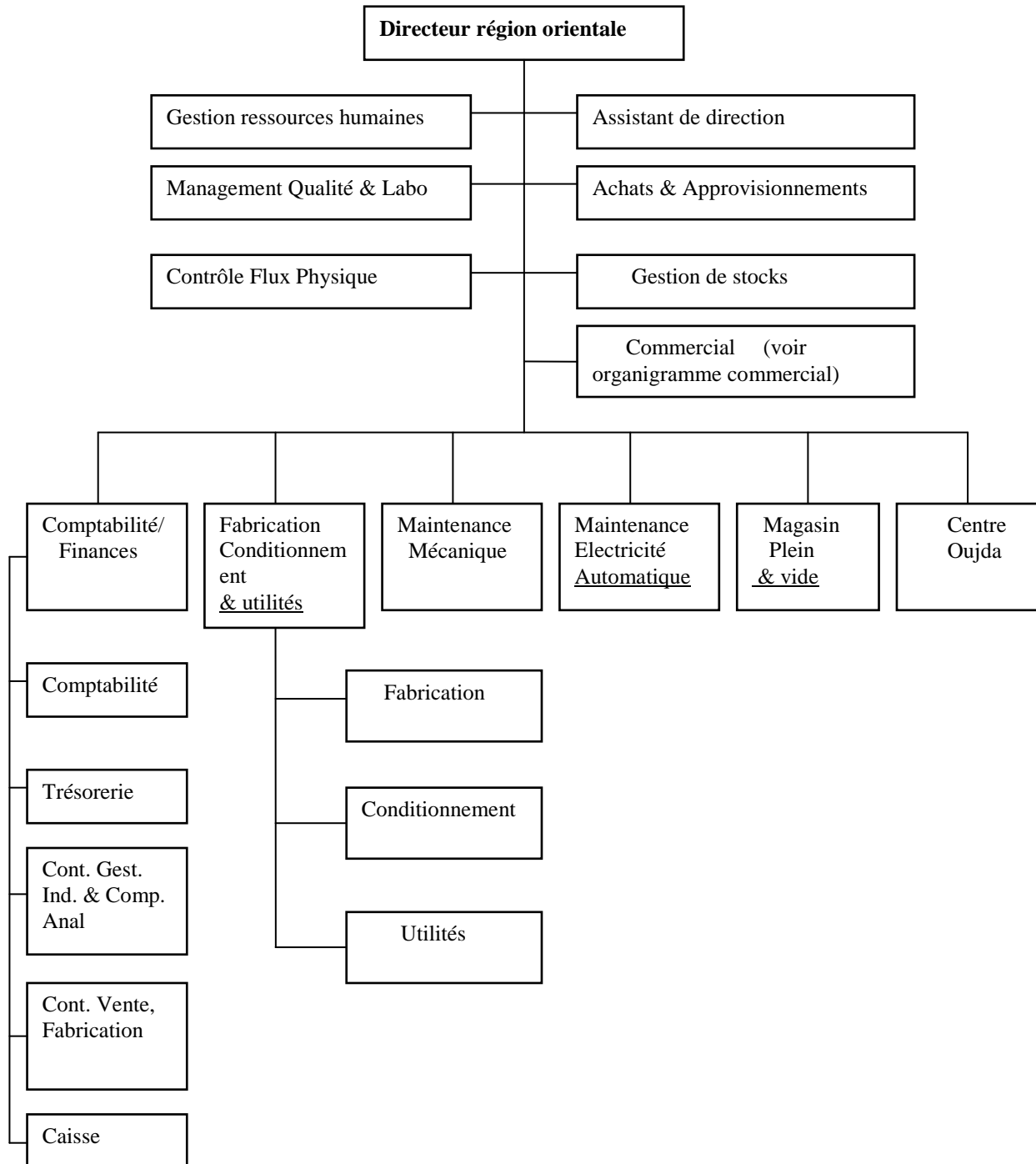


3) Organisation

a. Organigramme Commercial région orientale :



b. Organigramme de la région orientale :





II) Présentation de la bière et matières premières

1) Historique

La bière est connue depuis la plus haute antiquité. Les égyptiens utilisèrent d'abord le blé, puis l'orge pour obtenir une boisson alcoolisée alors dénommée "vin d'orge". Elle est encore consommée dans la plus grande partie de l'EGYPTE. Son usage s'étendit à la GRECE, Puis à la GAULE et à la GERMANIE où elle est restée la boisson favorite.

Mais il faut savoir que la bière des peuples anciens était différente de notre bière actuelle, elle était d'un degré alcoolique plus élevé que celui de la bière actuelle, elle fut longtemps fabriquée sans houblon qui donne le gout agréable légèrement amer à la bière moderne.

C'est au début du XVIème siècle que l'industrie de la bière appelée encore Brasserie commença son apogée. Elle est classée de nos jours au premier rang des industries agricoles de fermentation, La production mondiale en 2008 était environ 1 832 millions d'hectolitres selon FNDE (La Fédération Nationale de l'Epicerie de la France).

❖ Repères historiques

XX^{ème} siècle avant J.C	Les Egyptiens produisaient la Zythum qui était la boisson nationale.
Antiquité	Culture du houblon pour aromatiser la bière en Bavière.
VIII^{ème} siècle	Charlemagne ordonne que toutes ses métairies produisent de la cervoise.
IX^{ème} siècle	Apparition chez les celtes de la fermentation préalable de l'orge pour donner la cervoise.
1409	Jean-Sans-Peur, Duc de Bourgogne et Comte des Flandres généralise l'introduction du houblon lors du brassage.
1420	Naissance de la bière fermentée à froid en Allemagne mais il faut attendre le XIX ^{ème} siècle pour maîtriser la croissance des levures basses et ainsi voir le développement de la fermentation à froid.
1516	Introduction d'une loi en Bavière précisant les matières premières autorisées : malt d'orge, houblon et eau.
XVIII^{ème}	Dissolution des monastères, fin du rôle de l'église sur la fabrication de la bière.
1789	La révolution abolit les privilèges des corporations de brasseurs.
1857	Les travaux de Pasteur sur la fermentation permettent le développement industriel de la brasserie.
1910	Point culminant de l'industrie brassicole avec 2827 brasseries (en France).
1930	Diffusion de la fermentation basse (meilleure conservation) nécessitant de gros investissements : début de la concentration du secteur et



disparition en chaînes des petites brasseries de proximité.

2) Définition de la bière

La bière est une boisson désaltérante, consommée dans le monde entier et obtenue à partir de certaines céréales, notamment l'orge, le maïs, le riz et le blé, associées à l'eau et au houblon (Caporale et al., 2004) [1].

L'Ecole supérieure de Brasserie (Nancy) donne l'excellente définition suivante "la bière est le produit de la fermentation du moût de bière liquide sucré qu'on obtient en faisant macérer dans l'eau, à une température convenable. De la farine de malt (ou orge germée) en séparant le liquide de la matière solide soluble (ou drèche) en faisant bouillir ce liquide avec du houblon". (DE JOUFFROY, 1977) [2] La fermentation de ce moût de bière est provoquée par l'addition d'un levain constitué par un organisme vivant microscopique appelé "levure de bière".

3) Les matières premières

3.1) L'orge

C'est la matière première fondamentale de la bière. Normalement il est possible de faire de la bière avec toutes les céréales contenant de l'amidon. Mais l'orge présente des avantages suivants. (ROUILLER, 1986) [3]:

- L'orge est une céréale vêtue, les glumelles protègent la plumule qui se développe au cours de la germination.
- L'orge germe facilement
- L'orge germée est riche en enzymes, ce qui permet une solubilisation très rapide de ses composants.
- Dans sa composition, le rapport entre les glucides et les matières azotées est très bien adapté à la fermentation: Nutrition très équilibrée de la levure de bière.
- Son emploi est économique
- C'est une céréale très répandue, sa culture n'est pas limitée aux climats tempérés mais s'étend très loin dans les régions septentrionales aussi bien que les régions méridionales ;
- La filtration en brasserie est améliorée grâce aux enveloppes pailleuses qui allègent la masse filtrante.
- La température d'empesage est basse (environ 50°C) ce qui rend la saccharification aisée.
- Le rendement en malterie est élevé.

3.2) Les Grains crus

Par raison d'économie et parfois pour corriger la composition de l'extrait, on remplace au brassage une partie du malt par des grains non maltés appelés "grains crus". On emploie surtout la



farine du riz, de maïs ainsi que le manioc, l'orge et le Sorgho. Ainsi obtient-on de l'extrait moins coûteux que celui du malt maïs de moindre qualité. Cependant, si l'on limite la proportion de ces succédanés à 10-30%, la qualité de la bière n'en est pas altérée.

3.3) Le Houblon (DE JOUFFROY, 1977) [2]

C'est une plante grimpante de la famille des cannabinaées appartenant à l'ordre des urticales c'est une plante à floraison dioïque (les fleurs mâles et femelles poussent sur deux plantes différentes). Ce que l'on désigne par Houblon en brasserie, ce sont uniquement les fleurs femelles, celles-ci sont disposées en cônes et chacun de ces cônes est formé de folioles à la base desquelles se développe une forme de coupelles. Lorsqu'on ouvre un cône, l'ensemble des coupelles apparaît sous forme d'une poudre jaune appelée Lupuline; celle-ci secrète des résines amères et des huiles essentielles qui, dans la bière joueront le rôle d'aromates. Dans les résines ainsi secrétées, on a pu isoler deux acides cristallisables qui confèrent au houblon son pouvoir d'antiseptique: Ce sont l'humulone, acide en C_{21} et le lupulone acide en C_{26} . Quant aux huiles essentielles, ce sont surtout des hydrocarbures du groupe de terpènes, notamment du myrcènes qui contribueront au bouquet de la bière.

3.4) L'eau

L'eau est de toute première importance pour la brasserie où elle sert à deux usages bien distincts: Elle est utilisée, d'une part pour la fabrication proprement dite, c'est à dire pour la trempe, le brassage et le lavage des appareils. D'autre part pour l'alimentation des générateurs réfrigérants etc.... On ne doit employer que de l'eau adoucie et pure. En ce qui concerne la fabrication, les sels minéraux contenus dans l'eau de brassage ont une très grande influence sur la qualité de la bière, à ce point même que des types de bière universellement réputés. Par exemple la Pilsen, la Munich et Dortmund, doivent leur célébrité principalement à la nature spéciale des eaux utilisées.

Tableau 1 : Composition chimique de quelques eaux de brassage (mg/l) (MOLL, 1991) [4]

Paramètres	Pilsen	Munich	Dortmund
Résidu sec	51	536	984
Ca ²⁺	7,1	109	237
Mg ²⁺	3,4	21	26
HCO ₃ ⁻	14	171	174
SO ₄ ²⁻	4,8	79	318
NO ₃ ⁻	Traces	53	46
CL ⁻	5	36	56

Les sels de l'eau influent sur les réactions enzymatiques et colloïdales qui se passent au cours de la fabrication. Ils aident aussi à stabiliser l'extrait de sucres lorsqu'il est porté à l'ébullition avec le houblon. (PROTZ, 1995) [5] :



- ✓ Le bicarbonate de calcium (cause la plus courante de la dureté provisoire de l'eau) constitue une nuisance pour une brasserie car les sels gênent la fermentation et réduisent l'efficacité des autres sels minéraux.
- ✓ Le sulfate de calcium (ou gypse) est le bienvenu car il aide les enzymes à transformer l'amidon en sucre pendant l'étape du brassage, il maintient le niveau correct d'acidité dans la bière non fermentée et permet à la levure de travailler de façon optimale.
- ✓ Le sulfate de magnésium permet aux levures d'attaquer les sucres fermentescibles avec plus de vigueur.



Chapitre II

Fabrication de la bière



La fabrication de la bière comporte deux parties

- ✓ Le maltage ;
- ✓ La fabrication proprement dite.

I) Le Maltage

Le maltage a pour but d'obtenir à partir du grain d'orge un malt dont l'amande (grain d'amidon) est susceptible d'être transformée en sucres au cours du brassage. Le grain d'orge ne contient pratiquement pas de sucres fermentescibles mais comporte une amande riche en amidon insoluble dans l'eau. Donc Le maltage consiste en une germination contrôlée du grain d'orge et ayant pour but :

- de transformer l'amidon insoluble du grain d'orge en amidon soluble.
- de développer dans l'orge des enzymes qui agiront lors du brassage.
- de doter l'orge de l'arôme qui donnera son cachet à la bière.

Ces différents résultats sont obtenus par :

- un début de germination de l'orge qui assure la formation des diastases : des enzymes qui vont attaquer au cours du brassage le contenu de la graine et le dissoudre dans l'eau.
- un touraillage qui arrête la germination et donne l'arôme à l'orge.

Pour la fabrication de la bière les brasseries ont besoin du malt tout préparé. Cette opération se fait en grand dans les malteries spécialisées (hors des brasseries). Il y'a en pratique cinq opérations au niveau du maltage :

1) La préparation du grain

Cette opération consiste à débarrasser l'orge des impuretés par le nettoyage (tamisage, ventilation, triage ...) et par le calibrage de l'orge en catégories de différentes grosseurs à l'aide des tamis.

2) Le trempage

Il a pour rôle de fournir à la graine de l'orge de l'eau et de l'oxygène nécessaires à la germination mais aussi d'éliminer les inhibiteurs de la germination contenus dans les enveloppes de l'orge (DE CLERCK, 1980) [6]. Afin de ne pas asphixier le grain, l'humidité doit être de 43 % de son poids.

3) La germination

Le but de la germination est :

- ✓ De créer les enzymes qui vont permettre la solubilisation des matières de réserves du grain au brassage.
- ✓ Le développement de l'embryon aux dépens des réserves.



- ✓ L'attaque des membranes cellulaires de l'amande du grain par les hémicellulases. Il y'a une action protéolytique sur les protéines du grain et le dédoublement d'amidon en sucre.

Pour bien conduire la germination le malteur doit avoir parfaitement en main trois facteurs: la température, L'humidité et l'aération du grain. Les techniques de germination varient d'une malterie à une autre.

4) Le touraillage

Le grain dont la germination est achevée porte le nom de "malt vert". L'arrêt complet de la germination et la transformation du malt vert en une marchandise stable et achevée est obtenue par le touraillage. C'est une dessiccation sous chaleur soit par des gaz chauds, soit par de l'air chaud circulant dans des tuyaux chauffés par les gaz. On distingue deux phases dans le touraillage:

- La phase de dessiccation pendant laquelle les dédoublements enzymatiques se poursuivent encore et qui peut être considérée comme une continuation de la germination.
- Le chauffage du malt sec pendant laquelle il ne se produit plus que des réactions chimiques et physico-chimiques entre les composantes du malt. Il se passe aussi la transformation des produits colorés appelés "melanoïdines". Ce sont des combinaisons de sucres et d'acide aminés (réactions de maillard). Les melanoïdines ne jouent pas seulement le rôle de colorants et de porteurs d'arômes dans la bière, elles protègent en outre la bière contre les troubles par leurs pouvoirs réducteurs (DE CLERCK, 1980) [6].

5) Le Dégermage

Le malt touraillé doit être bien débarrassé de ses radicules, car celles-ci ne sont pas favorables à la qualité de la bière.

Tableau 2: La composition moyenne du malt. Selon HOPKINS et KRAUSE [7].

Amidon	58%
Sucres réducteurs	4%
Saccharose	5%
Pentosanes Solubles	1%
Pent et hexanes insolubles	9%
Cellulose vraie	6%
Matières azotées	10%
Matières Grasses	2,5%
Matières minérales	2,5%
Tanins et Vitamines	2%

Tableau 3: Les enzymes de type des hydrolases présentant dans le Malt selon HOPKINS et KRAUSE [7]:



Enzymes	Optimum de	
	pH	Température °c
Amylase α	5,7	65
Amylase β	4,7	55
Protéinase	4,3	50
Peptidase I	7,8	40-45
Peptidase II	8,6	40-45
Cellulase	5,6	35
Phylase	5,2	60

N.B.:

Cette opération se fait dans des malteries hors des brasseries, le malt utilisé pour la préparation de la bière à BRANOMA est importé de l'étranger.

II) LA FABRICATION DE LA BIÈRE PROPREMENT DITE : (voir la figure 1)

Elle comprend cinq phases essentielles qui sont : Le brassage; La fermentation; Filtration; Soutirage; Pasteurisation.

1) Le brassage

Il a pour but d'extraire tous les principes utiles du malt et du houblon et éventuellement des succédanés. Il comporte:

- Le concassage du malt ;
- Extraction de la mouture/ Brassage ;
- La filtration du mout ;
- Cuisson et houblonnage du mout ;
- Traitement et refroidissement du moût.

1.1) Le concassage du malt :

Le concassage permet d'obtenir une mouture constituée de farine et d'écorces de malt. Le malt, arrivé en brasserie, est réduit à l'état de mouture par passage dans des concasseurs cylindriques. L'écartement des cylindres détermine le pourcentage de farine, gruaux et écorces (PROTZ, 1995) [5].

Il est indispensable de concasser le malt de façon à maintenir les écorces entières, qui serviront par la suite de support de filtration et d'éviter une mouture avec une proportion trop importante de fine



farine de particules inférieures à 120 μm , qui formerait alors une couche imperméable lors de cette filtration. (MOLL, 1991) [4]

Tableau 4: les différentes catégories de la farine du malt selon la société de BRANOMA

Les catégories de la farine	Le pourcentage
Enveloppes	13%
Gros Gruaux	7%
Fine Gruaux	24%
Farine	34%
Farine fine	22%

1.2) Extraction de la mouture/ Brassage :

Le but du brassage est de solubiliser la plus grande quantité de matières hydrosolubles de malt, appelée extrait, pour obtenir un mélange sucré : l'amidon du malt sous l'action d'enzymes va se transformer en sucres, principalement en maltoses et dextrines. Donc le brassage consiste à ajouter de l'eau à la farine de malt (empâtage) et à chauffer le mélange obtenu (extraction de la mouture).

Tableau 5 : Les différents paliers de température utilisés (MOLL, 199 1) [4]:

Paliers de température	Transformations
45 à 50°C	Dégradation du manteau protéolytique des grains d'amidon permettant la libération des β -amylases
60 à 65°C	Action des β -amylases qui transforment l'amidon en sucres fermentescibles (en majorité du maltose)
70 à 75°C	Action des α -amylase qui transforment l'amidon en maltose et dextrine

La transformation de l'amidon en sucres procède par plusieurs étapes :

- ✓ l'empesage : éclatement des grains d'amidon dans l'eau chaude et gélatinisation ;
- ✓ la liquéfaction : rupture des chaînes polymériques formant l'amidon, ceci entraînant une diminution de la viscosité ;
- ✓ la saccharification : formation de sucres fermentescibles par l'intervention de différentes enzymes dont il convient de définir les conditions optimales de fonctionnement dans le tableau suivant :



Tableau 6 : les conditions optimales de fonctionnement des enzymes (MOLL, 1991) [4]:

Enzyme	pH optimum	T° optimale (°C)	T° d'inactivation (°C)	Action sur les liaisons/ les composés
α -amylase	5,3 – 5,8	70 – 75	75-80	α -1,4 (endo)
β -amylase	5,2 – 5,6	63 – 65	68-70	α - 1,4(exo)
débranchante	5,0 – 5,5	55 – 60	65	α – 1,6
α -glucosidase	4,5	-	-	Maltose
Saccharase	5,5	55	55	Saccharose

L'amidon est transformé en sucres fermentescibles et non fermentescibles (MOLL, 1991) [4]:

- Les glucides fermentescibles représentent 75 à 85% de l'extrait total et sont en majorité du maltose mais aussi : maltotriose, glucose, saccharose, fructose.
- Les autres 15-25% de l'extrait sont des dextrans non fermentescibles (α -glucanes) jouant un rôle important dans le goût de la bière, et des β -glucanes, des gommés et des pentosanes.

Les principales transformations ont lieu au niveau des composés glucidiques puisqu'ils représentent environ 90% des solides du mélange. Les autres réactions sont représentées dans le tableau suivant (MOLL, 1991) [4]:

Tableau 7 : les différentes réactions des substrats non glucidiques

Substrats	Actions	Produits Formés	T° Optimales
Protéines (albumine, globuline, prolamine, glutéline)	Endopeptidase Carboxypeptidases Aminopeptidases Dipeptidases	Acides aminés libres Di ou Tripeptides	50°C
Phosphates organiques	Phosphatases	Phosphates primaires	50 – 55°C
Lipides	Lipases	Acides gras Stérols Phospholipides	50°C
Polyphénols	Actions enzymatiques et chimiques	Catéchine Prodelphinidine Proanthocyane	-
Minéraux	Extraction	Cu, Zn, K, Ca, Mg, Na ...	-

N.B :



Il est à noter qu'une protéolyse trop importante au cours du maltage puis au brassage dégrade les fonctions protéolytiques responsables de la stabilité de la mousse (MOLL, 1991) [4].

→ **Technique d'extraction de la mouture/brassage à BRANOMA**

Le brassage commence par ce qu'on appelle l'empattage qui consiste à mélanger la mouture et l'eau chaude dans la cuve matière pour avoir une température de 58°C.

Au même temps dans une autre cuve, on prépare l'amidon (succédanés), par le mélange d'une quantité d'amidon de maïs avec de l'eau chaude pour avoir une température de 52°C. Ensuite l'amidon sera transféré vers une nouvelle cuve où il sera mélangé avec une quantité du produit d'empattage pour donner une température de 56°C, le mélange sera chauffé pendant 10 minutes à 72 °C, ensuite il passe par un autre pallier pendant 5 minutes à 100°C. Après cette étape on verse le mélange dans la cuve matière où il sera mélangé avec le reste de la préparation d'empattage, la température obtenue est de 68°C, après 20 minutes à cette température, on chauffe le mélange à 76°C pendant 10 minutes. Ensuite le mélange (maïs) sera filtré.

Tableau 8 : la composition moyenne du moût après le brassage (DE CLERCK, 1980) [6]:

Fructose	1,3%
Glucose	9,3 à 10,3%
Saccharose	2,4 à 6,5%
Maltose	41 à 52%
Maltotriose	12,3 à 13%
Maltotétraose	2,1 à 5,9%
Maltopentose	1,3%
Maltohexose	1,9%
Dextrines	11,5 à 23%

1.3) La filtration et lavage des drêches

Selon (HELL, 1981) [8] le but du brasseur est de séparer la phase liquide, le moût, de la phase solide, les drêches (écorces, enveloppes, . . .).

La solution obtenue après le brassage (maïs) contient toutes les substances solubles et une partie insoluble (Drêche) d'où la nécessité de la filtrer, l'opération se passe en deux phases :

- ❖ écoulement du moût.
- ❖ lavage de l'extrait qui imbibe encore la drêche.



Les lavages sont assurés par une circulation d'eau à environ 80°C pour obtenir 75°C à la sortie du filtre ou de la cuve. La quantité d'eau à utiliser dépend de la qualité de la bière que l'on veut obtenir. Cependant, il ne faut pas pousser trop loin cette opération car il y a risque d'extraction de substances indésirables en provenance des enveloppes du malt (BALLAT, 1998).

La qualité de la bière peut souffrir :

- Si le moût et les eaux ne s'écoulent pas clairs.
- Si l'alcalinité de l'eau n'a pas été corrigée (éviter la dissolution des matières tanniques et amères des enveloppes).
- L'eau de lavage doit avoir une température d'environ 80°C.
- La technique de filtration.

1.4) Cuisson et houblonnage du mout

Une fois filtré le moût est envoyé vers une cuve appelée chaudière à houblonner où il va être porté à ébullition. Cette ébullition a pour objet de stabiliser la composition du mout, de concentrer le moût et de l'aromatiser avec le Houblon. La cuisson stabilise le moût en détruisant les enzymes, en le stérilisant et en faisant coaguler les matières azotées complexes (GAY, 1971 : HELL, 1981) [9].

Les transformations à la cuisson du moût :

- ✓ Coagulation des matières azotées.

Cela consiste à une dénaturation des protéines et à leurs précipitations sous l'effet du pH et de la température.

- ✓ L'aromatisation par le houblon.

Sous l'effet de la chaleur, les résines amères de l'humulone et la lupulone subissent une isomérisation en isohumulone, seul l'iso-humulone à un pouvoir d'amertume.

- ✓ La transformation des tanins ou polyphénols.

Le tanin du houblon est entièrement soluble dans le moût bouillant, une fois dissout ces tanins s'oxydent et se combinent plus facilement aux protéines, Le produit de cette combinaison est insoluble et précipite.

- ✓ La coloration du mout

L'ébullition augmente la coloration du mout, ceci est dû essentiellement à la caramélisation des sucres, à la réaction de maillard et aussi à l'oxydation des tanins.

- ✓ La formation des réductones



Le mout subit une réduction pendant l'ébullition, L'oxygène dissous s'échappe alors et donne lieu à des réductones. La formule brute de la réductone est $C_3H_4O_3$ et serait la forme énolique de l'hydroxy methyl glyoxal :

$CH_2OH - CO - COH$ Hydroxy Methylglyoxal	$[HCOH = COH - COH]$ Réduction
--	-----------------------------------

Le pouvoir réducteur des reductones est du aux groupements énoliques qui s'oxydent selon la réaction suivante :



Ces substances constituent une protection contre l'oxydation du mout (BOURGEOIS et al., 1980) [10].

1.5) Traitement et refroidissement du moût.

Le mout sort à $100^\circ C$ de la Salle à brasser riche en précipité (cassures et drêches de houblon), le principe est d'avoir un mout clair à une température convenable pour l'ensemencement puisque la levure est déjà tuée vers $40^\circ C$, tout en assurant la stérilisation.

Après la phase d'ébullition, le moût contient des troubles qui sont essentiellement de deux types (HELL, 1981) [8]:

- Les troubles grossiers provenant des cassures au niveau de l'ébullition.
- Les troubles fins qui apparaissent au refroidissement dont la composition est mal connue mais qui ont l'inconvénient de donner un gout vulgaire à la bière.

L'élimination de ces troubles se fait dans un bac d'attente avec décanteur à mout (Whirlpool), ensuite le moût est refroidis jusqu'à $9^\circ C$, la température favorable pour le démarrage de la fermentation basse.

→ Composition du mout final.

La composition finale du moût joue un rôle très important sur les propriétés de la bière finale, Le moût doit contenir:

- ✓ les quantités de sucres fermentescibles voulues pour les levures.
- ✓ les quantités de matières azotées nécessaires au développement de la levure (Acides aminés tels que Valine leucine ...).
- ✓ les composés de flaveur du malt et du houblon.



- ✓ Les constituants indésirables et précurseurs de mauvais goût et antimousse doivent être contrôlés.

2) La fermentation

La bière est obtenue par fermentation alcoolique du moût grâce à une levure du genre *Saccharomyces* (Bartowsky et al., 2004) [11] qui joue un rôle important dans les activités humaines. Elle est en effet utilisée comme modèle d'organisme eucaryote dans de nombreux champs d'expérimentation biologique et génétique et surtout dans de nombreux procédés de fermentation, notamment lors de la préparation de boissons alcoolisées (Fleet et al., 1992; Jolly et al., 2006; Glazer et al., 2007) [12, 13 et 14]. L'espèce *Saccharomyces carlsbergensis*, levure de fermentation basse, est utilisée comme agent de fermentation pour la production industrielle de la bière.

Le mout décanté est ensuite refroidis jusqu'à 9°C, aérer, puis transférer vers des fermenteurs, la fermentation vise principalement à produire de l'alcool. C'est dans les cuves de fermentation qu'on ajoute la levure à raison d'un litre environ pour 100 litres de moût.

Grâce à la levure, les sucres du moût sont transformés en alcool et en gaz carbonique. Les diastases, zymase et invertase (3 enzymes présents dans la levure) s'attaquent d'abord à l'oxygène présent dans le moût, puis aux sucres, ce qui produit du dioxyde de carbone et de l'alcool. On distingue deux fermentations successives: la fermentation principale et la fermentation secondaire ou GARDE.

2.1) la fermentation principale

La fermentation principale permet la croissance de la levure et donc la transformation des sucres du moût en alcool et la réduction du taux de diacétyle, métabolite secondaire néfaste à la qualité organoleptique de la bière (Lodolo et al., 2008) [15].

2.1.1) La levure de bière

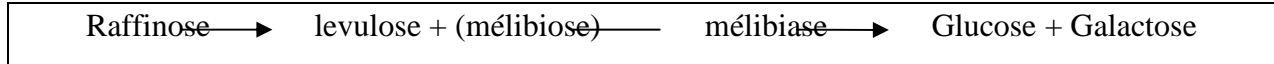
La levure de bière est du genre *saccharomyces* on distingue 2 espèces :

- *Saccharomyces carlsbergensis* ou levure basse
- *Saccharomyces cerevisiae* ou levure haute.

Toutes les autres levures sont dites levures sauvages et considérées comme agents d'infection. Les 2 types de levures de bière se distingue par le fait que : *Carlsbergensis* fermente plus facilement à basse température jusqu'à 0°C et qu'elle se dépose au fond de la cuve en fin de fermentation tandis que *cerevisiae* ne fermente pas généralement en dessous de 10°C et monte à la surface du moût en fin de fermentation.



Carlsbergensis possède la raffinase et la mélibiase. Ces 2 enzymes permettent de fermenter la raffinose (Trisaccharide). Par contre Céréviseae ne possédant pas la mélibiase ne peut catalyser que le 1/3 de la raffinose.



Les levures hautes ayant un coefficient respiratoire plus élevé peuvent respirer grâce à un enzyme appelé succinate oxydase, enzyme que les levures basses ne possèdent pas.

- **Morphologie et composition**

Les levures de bières sont caractérisées par leur forme globuleuse. Sphérique et plus généralement ovoïde. Elles peuvent se réunir en chapelet. La levure de bière contient 75 % d'eau. Les constituants les plus importants en poids sont le glycogène, le tréhalose, Les matières azotées, Les gommes, Les matières grasses et les matières minérales. Le pH interne de la levure est de 5.6 à 6. A côté de ces substances. On trouve toute une série d'agents biotiques par lesquels, Les levures peuvent exercer leur métabolisme. Ce sont:

- ✓ Les enzymes comme principalement les hydrolases (carbohydrolases qui détermine fermentescibilité des sucres), les protéases, les transférase et les cytochromes oxydases ou ferments de respiration.
- ✓ Les facteurs de croissance et les vitamines.

- **Fermentation alcoolique et respiration**

La levure à besoin en première phase de l'oxygène pour transformer le sucre en CO₂ et H₂O plus l'énergie nécessaire à son développement :



En deuxième phase, en absence d'oxygène, la levure transforme le sucre fermentescible en alcool et CO₂, c'est la fermentation alcoolique :



2.1.2) Transformation pendant la fermentation de la bière

- **L'Atténuation**

La principale transformation est donc la fermentation des sucres, La formule de Gay-lussac :



Montre que le sucre qui est plus dense dans l'eau est remplacé par l'alcool moins dense et du CO₂ gazeux qui s'échappe. La densité du mout va donc diminuer et c'est cette diminution qui va servir



de mesure au brasseur pour contrôler la progression de la fermentation, il lui donne le nom de « atténuation » et l'exprime en % de diminution de la densité.

Si E = teneur en extrait du mout initial ;

E' = teneur en extrait de la bière fermentée.

$$\text{Alors Atténuation } A = \frac{E - E'}{E} \times 100$$

- **Métabolisme des matières azotées**

La levure absorbe 50 % des matières azotées du moût et rejette dans la bière le 1/3. La teneur en azote diminue donc de 1/3 pendant la fermentation. Cette diminution est aussi due à la précipitation de matières azotées complexes.

- **Les matières volatiles**

La levure produit une série de matières qui vont donner un parfum à la bière et qui influencent aussi la stabilité de la mousse. On distingue 5 catégories :

- Les alcools supérieurs ou « huile de fusel » en moyenne 50 mg/l environ et qui donnent un goût amer à la bière. Les principaux représentants sont : alcool isoamylique, alcool isobutylique et l'alcool amylique.
- Les acides volatiles (acide acétique, acide formique).
- Les esters, ce sont les agents de l'arôme de la bière, le plus important est l'acétate d'éthyle.
- Les aldéhydes et dérivées.

Les aldéhydes ne sont pas si importants par eux-mêmes, mais surtout par leurs dérivées, dont certains sont très dangereux pour le goût de la bière. Deux en sont bien connus jusqu'à présent :

- Le diacétyle donne un très mauvais goût à la bière.
- L'acétoïne donne un goût de renfermer à la bière.

- **Acidité et acide carbonique**

Le pH diminue au cours de la fermentation cet abaissement provient de la formation du CO_2 et d'acides organiques. Le pH normal de la bière est compris entre 4.0 et 4.4.

- **L'oxygène, substances réductrices**

L'oxygène disparaît avec la respiration de la levure dès le début de la fermentation. Il reste cependant un peu d'oxygène soit 3 % de l'oxygène (DE CLERCK et VAN CAUWENBERGE, 1956) [16]. Le potentiel d'oxydoréduction diminue cependant au cours de la fermentation. Passant de 20 au début à 11 à la fin de la fermentation.

- **Transformations diverses**



La coloration baisse pendant la fermentation les isohumulones sont éliminés en partie, une diminution de l'ordre (9-13 %). Les polyphénols sont éliminés aussi en partie par adsorption à la levure variable d'une souche à l'autre et par la formation des écumes.

2.2) fermentation secondaire ou la garde

Il s'agit d'une étape de maturation pendant laquelle la bière est maintenue à 0°C dans des cuves fermées hermétiquement. Elle y subit une seconde fermentation qui lui permet de s'affiner et de s'équilibrer : sucres et levure continuent de travailler, tout en produisant du gaz carbonique et la bière prend tous ses arômes.

Les buts à poursuivre au cours de la garde sont :

- Laisser déposer les levures et les particules amorphes qui troublent la bière ;
- Saturer la bière de CO₂ ;
- Affiner le goût de la bière
- Précipiter le trouble au froid, pour obtenir des bières plus brillantes ;
- Réduire la bière et la maintenir à l'abri l'oxygène de l'air ;

3) La filtration

Selon (GAY, 1971) [17], le but de la filtration est de rendre la bière plus brillante et plus stable, le filtre chargé de clarifier, de stériliser et de stabiliser la bière réalisé cela par deux actions tout à fait différentes :

- le tamisage qui consiste à arrêter mécaniquement les particules trop grosses pour traverser les pores du filtre et,
- l'adsorption, qui consiste à arrêter les substances même moléculairement dissoutes.

A BRANOMA, la filtration se fait avec un filtre à Kieselguhr à plaques rainurées entre lesquelles on serre les cartons. Un Alluvionneur permet la formation des précouches et de l'alluvionnage. La formation de précouche de Kieselguhr sur les cartons-support du filtre est faite par une suspension Kieselguhr préparée avec de l'eau. L'alluvionnage est fait elle avec une suspension de Kieselguhr préparée avec de la bière. La bière pénètre par un canal latéral dans les rainures d'une plaque, passe à travers le carton et s'écoule par les rainures de la plaque suivante.

4) Le soutirage

Nous sommes maintenant au dernier stade de la préparation de la bière et toute faute que l'on commettrait ne pourrait plus se rectifier. Le soutirage est la plus grande source d'oxydation de la bière et peut constituer un grave danger d'infection. De plus, pour une bonne présentation, les bouteilles doivent être propres et bien étiquetées.



Une fois les bouteilles lavées (soude, eau) et inspectées, celles-ci doivent être remplies sans qu'il y ait de contact entre la bière et l'air ambiant (O_2 et les microorganismes ambiants sont nocifs pour la bière). Ainsi les bouteilles sont remplies avec une contre pression du CO_2 . A la sortie de la soutireuse, le travail consiste à faire mousser la bière (pour que le volume du goulot soit occupé par de la mousse) par l'intermédiaire d'un fin jet d'eau. Ensuite la bouteille est encapsulée (MOLL, 1991) [4].

→ **Les dangers imputables au soutirage :**

• **L'oxydation au soutirage.**

Pendant le transfert dans les bouteilles la bière sera en contact avec l'air. L'oxygène de l'air dans le col va progressivement se dissoudre dans la bière après soutirage. Cette oxydation aura des conséquences néfastes :

- Suite à l'oxydation des matières amères du houblon et des matières volatiles (α -acétolactate), le goût et le parfum de la bière vont devenir déplaisant.
- La diminution de la stabilité colloïdale de la bière.
- L'augmentation de la coloration de la bière.

• **L'infection au soutirage**

Compte tenu des difficultés rencontrées pour stériliser les soutireuses, une stérilisation soignée doit être faite au niveau des bouteilles. Car les infections au soutirage sont toujours redoutables parce que les microorganismes qui s'y développent sont directement acclimatés à la bière donc capables de s'y développer rapidement.

- Un autre danger imputable au soutirage est la perte d'acide carbonique. On doit donc maintenir la bière sous une contre-pression suffisante pour que l'acide carbonique n'ait pas à s'échapper.

5) Pasteurisation

La bière contient encore quelques cellules de levure ; elle est donc sujette à une refermentation, avec apparition d'un trouble non dangereux pour la consommation. La pasteurisation va permettre d'éliminer ce phénomène, la bière est chauffée progressivement à $65^\circ C$ puis refroidit très rapidement. Avec ce choc thermique, les germes nocifs pour la bière (levures et bactéries) sont détruits ou fortement affaiblis. La bière ainsi traitée supporte une longue conservation (GAY, 1971) [17].

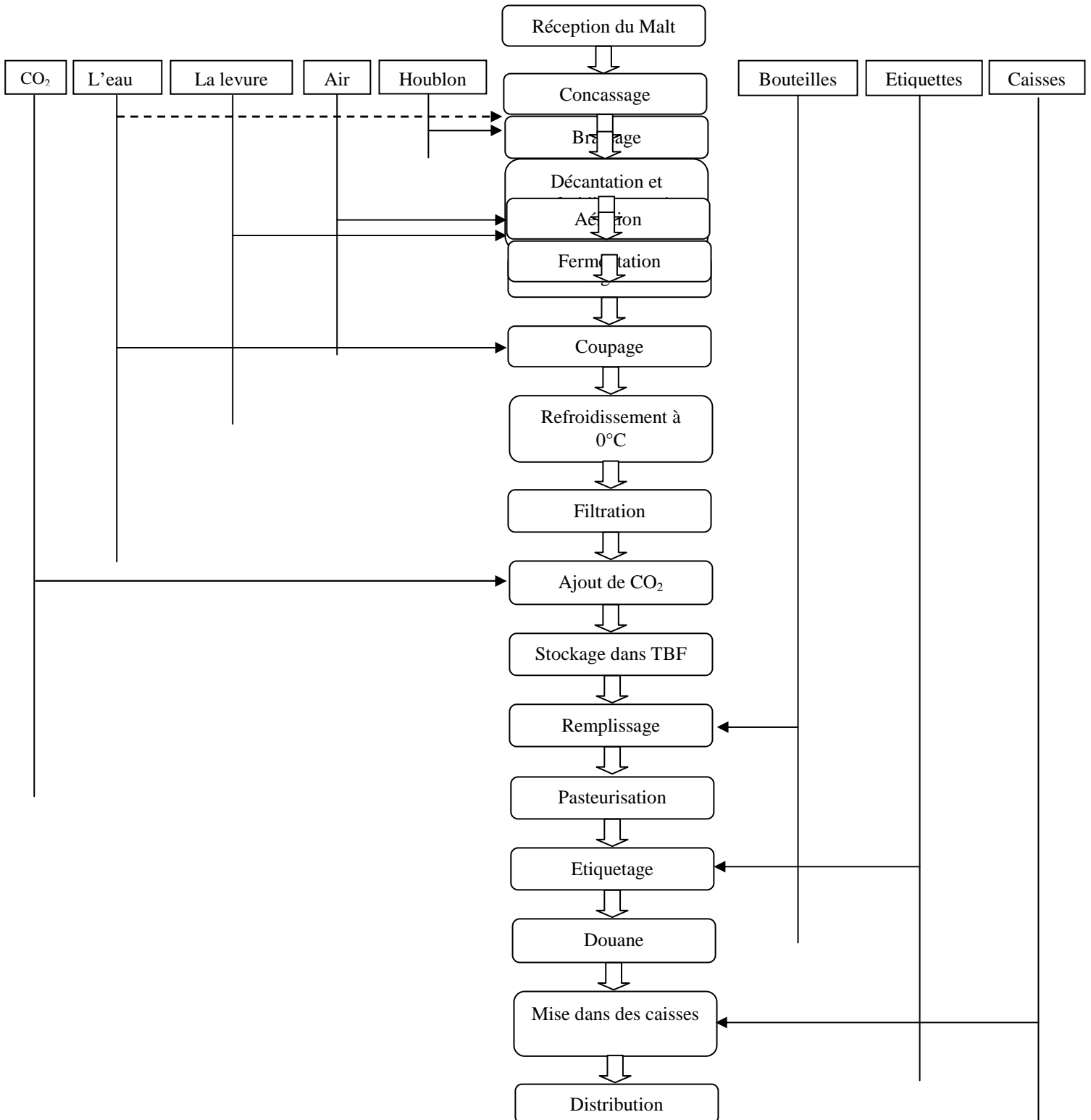




Figure 1: Diagramme de fabrication de la bière au sein de la société « BRANOMA »

Chapitre III

L'origine de l'oxygène moléculaire dans la bière



Bien que ce travail ait pour but l'étude des facteurs intervenant sur la dissolution de l'oxygène de l'air lors du processus de fabrication de la bière, il est important avant tout d'exposer l'aspect théorique des phénomènes d'oxydoréduction et l'oxydation par l'oxygène moléculaire. Cela permettra de mieux comprendre et connaître le rôle néfaste que peut jouer l'oxygène sur la qualité organoleptique de la bière.

1) L'oxygène

L'oxygène est l'élément le plus abondant de la couche terrestre. On en trouve dans les eaux naturelles et les roches. Il représente un pourcentage important dans l'air atmosphérique. C'est un gaz incolore, inodore et insipide. L'oxygène à longterm permis la définition de la notion d'oxydation qui signifiait à l'origine la fixation d'oxygène sur un corps ou une liaison. Sa présence dans la bière peut être due aux opérations d'oxygénation et d'aération ou enfin à un contact fortuit entre la bière et l'oxygène de l'air au cours des différents traitements:

- ✓ l'oxygénation est une action typiquement physique qui consiste à dissoudre de l'oxygène moléculaire dans le mout. Une teneur en oxygène de 9 à 12 *mg/l* dans le mout avant fermentation permet à la levure une bonne multiplication cellulaire lors de la phase aérobie et un bon départ de la fermentation.
- ✓ l'aération est un phénomène semblable qui consiste à réaliser la dissolution de l'air ($N_2 + O_2$ + autres gaz) dans le mout. Cela permet dans les conditions habituellement rencontrées en brasserie d'avoir un taux d'oxygène dissous dans le mout de l'ordre de 6 à 9 *mg/l*.

La dissolution de l'oxygène dans la bière est responsable des phénomènes d'oxydation nuisibles pour la qualité organoleptique de cette boisson. .

2) Solubilité de l'oxygène dans l'eau, mout, Bière.

La dissolution (Absorption) de l'oxygène est un phénomène physique qui consiste dans les conditions optimales de dissoudre en phase liquide l'oxygène soluble en phase gazeuse. Le phénomène inverse s'appelle la désorption.

Les phénomènes d'absorption et de désorption sont assez complexes, nous nous contenterons de donner ici un aperçu sur la solubilisation de l'oxygène dans les liquides à l'aide de trois lois fondamentales de physique et de physico-chimie, telles que la loi de Henry, Dalton, et Fick qui régissent bien les phénomènes de diffusion et d'équilibre entre gaz et liquide. En se basant sur ces trois lois sous citées nous pouvons dire que la dissolution de l'oxygène de l'air dans le moût et bière dépend :

- de la nature du liquide (moût, bière ...)



- de la température et pression, (plus la température et la pression sont élevées, plus la dissolution est importante et vice-versa).
- de la pression partielle de l'oxygène dans un mélange gazeux, (l'accroissement de la pression va augmenter la dissolution).
- du gradient de concentration en oxygène entre l'air et le liquide.
- de la valeur des interfaces entre l'air et de liquide et du renouvellement de celui-ci. Plus la surface de contact du liquide avec l'air est grande plus la dissolution est importante (agitation, turbulence, brassage, convection).

Il faut souligner que la diffusion de l'oxygène dans la bière (liquide carbonate) s'écoulant dans un tank pressonné à l'air est inférieure à celle de l'eau (liquide non carbonaté). Cela résulte du fait que le CO₂ tend plus rapidement vers un équilibre, puisque la pression partielle du CO₂ dans la phase gazeuse est faible.

3) Contribution des matières premières et du procès sur la formation des réducteurs.

On considère les réducteurs en brasserie comme étant des substances capables de réduire l'oxygène moléculaire dans un milieu aqueux leur pouvoir réducteur peut être déterminé par des méthodes au nombre desquelles on cite celle de De CLERK et Van cauwenberge [16].

Selon le temps de réduction du 2.6. Dichlorophénol indophénol (DIP) ces auteurs ont classé les réducteurs en trois catégories :

- a) réducteurs immédiats (réduction du DIP en 15 secondes) : reductones (Acide ascorbique)
- b) réducteurs rapides (réduction du DIP en 5 minutes) : melanoïdines.
- c) réducteurs lents (réduction du DIP en 2,5 heures) : polyphénols.

Il faut souligner que entre ces trois catégories de réducteurs il n'y a pas frontière bien précise.

Les reductones sont fortement réducteurs ils se forment lorsque l'on chauffe des sucres en milieu alcalin.

Les melanoïdines se forment à chaud surtout en milieu aqueux concentré. Ce sont des combinaisons sucres et d'acides aminés ou de chaînes protidiques comportant des groupements aminés libres (Réaction de Maillard).

Les Polyphénols ont une grande importance qualitative en particulier sur la formation des troubles colloïdaux et le vieillissement de la bière.

On peut distinguer deux types de réducteurs : naturels d'une part, et artificiels d'autre part. Les réducteurs naturels se trouvent dans les matières premières et se forment en grande partie lors de la



fabrication. Par contre les réducteurs artificiels sont fabriqués en dehors de la brasserie et représentent en général des substances pures prêtes à l'emploi.

4) Absorption et réduction de l'oxygène de l'air au cours de la fabrication de la bière.

Il est intéressant de connaître les quantités d'oxygène absorbées et réduites, afin de pouvoir diminuer son action néfaste sur la qualité de la bière :

4.1) Concassage

Peu de travaux ont été réalisés sur l'apport de l'oxygène par la mouture sèche ou mouture humide du malt et l'influence sur la qualité de la bière.

4.2) Empatage – maische

Les travaux de Lie et coll [18] ont montré que les valeurs de l'absorption de l'oxygène à l'empâtage (20 à 50 mg O₂ /L) sont plus importantes que celles observées lors de l'ébullition (5 à 25 mg O₂/L) et dans le Whirlpool (5 à 30 mg O₂/L). Dans tous les cas l'absorption augmente fortement pendant la montée en température.

4.3) Filtration de la maische

Il a été mis en évidence par Desrone et coll [19] qu'une dissolution excessive d'oxygène dans la maische diminue de l'ordre de 2,5 la filtrabilité du moût. Dans ce cas le Teig qui est une matière colmatante de couleur brunâtre et majoritairement constitué de protéines se concentre dans la partie supérieure et forme un capuchon imperméable rendant la filtration difficile quand bien même celle-ci est réalisée sous une pression de l'ordre de 1 bar.

4.4) Ebullition du moût

L'ébullition du moût est une étape importante dans le processus de la fabrication de la bière. En effet. WAN LAER et ROZENTHAL [20] ont montré que la fixation de l'oxygène est étroitement dépendante non seulement de l'agitation et du pH, mais également et surtout de la température d'ébullition du moût.

DE CLERCK J. et H. VAN CAUWENBERGE [16] de leur côté ont étudié avec précision la fixation d'O₂ par le moût et ont rapporté que des moûts de brassins entièrement réalisés à l'abri de l'air restaient très troubles et que les bières qui en résulteraient conservaient un trouble laiteux qui reste en suspension. Il en résulte que la réaction d'oxydation commencée en chaudière se poursuit pendant le refroidissement mais qu'elle ralentit lorsque la température descend au dessous de 80 – 85° C.



Se Ion DE CLERCK J. [6], l'oxydation des moûts est nécessaire mais doit être limitée. Son affirmation est soutenue par le constat que toute bière préparée à l'abri de l'air est instable et de mauvaise qualité.

4.5) Fermentation

Le moût mis en fermentation doit contenir une certaine quantité d'oxygène dissous pour assurer une multiplication satisfaisante de la levure. Dans la plupart des brasseries et principalement à la BRANOMA l'aération du moût est réalisée à l'aide d'une bougie poreuse en acier inox installée dans la tuyauterie du moût. L'air exempt d'humidité et de traces d'huile est introduit dans le moût, seulement les deux premiers brassins qui sont aérés avec 2,5 bars pour chaque brassin dont la totalité est de 5 bars par cuve (6 brassins). Toutefois le taux d'oxygène dissous varie en fonction de la souche de levure utilisée. En effet, les levures peuvent être réparties en quatre classes en fonction de leurs besoins en oxygène dissous dans le moût. KIRSOP B. H. [21], a proposé la répartition suivante :

Les levures de la classe 1 ont besoin de 4 mg O₂/ L

Les levures de la classe 2 ont besoin de 8 mg O₂/ L

Les levures de la classe 3 ont besoin de 40 mg O₂/L

Les levures de la classe 4 ont besoin plus de 40 mg O₂/ L

Il est à noter que la présence de l'oxygène tout en étant indispensable pour la croissance de levures, permet la synthèse et l'accumulation dans la levure de stérols (Ergosterol) et d'acides gras insaturés. Les Stérols formés constituent une réserve énergétique et représentent un facteur de survie nécessaire à la levure lors de la fermentation. Au début de fermentation, l'oxygène dissous est réduit après 4 à 5 heures pour les cas de fermentation accélérée et après 10 à 11 heures au cours des fermentations classiques. Toutefois la vitesse de réduction est dépendante de la souche et de l'âge de l'inoculum. Au cours de la fermentation, l'oxygène dissous exerce une influence directe sur la production et l'accumulation d'un grand nombre de produits secondaires qui du reste jouent un rôle prédominant sur la qualité organoleptique de la bière. Ainsi une augmentation de l'oxygène dissous dans le mout conduit à un accroissement de la production de 2.3-Pentanedione et du diacétyle.

4.6) La garde

La garde est la phase de la technologie de la fabrication de la bière au cours de laquelle tout apport d'oxygène peut nuire à la stabilité et la saveur de la bière. En effet, la présence d'oxygène à ce stade



provoque l'oxydation de l' α -acetolactate en diacétyle qui, s'il n'est pas ultérieurement réduit par la levure, reste accumulé dans la bière.

4.7) Filtration

L'oxygène dissous au cours de la filtration dépend de la quantité qui se trouve dans la bière à l'arrivée du filtre, de l'eau et d'autres facteurs.

4.8) Tank bière filtrée ou claire (TBF)

L'absorption de l'oxygène par la bière lors du remplissage du TBF est semblable à celle en tank de garde. D'après EYBEN et VAN DROGEN BROEK [22] l'usage des déflecteurs placés devant l'orifice d'entrée de la bière dans un tank peut réduire de moitié la prise d'oxygène. La réduction de la vitesse d'écoulement (1,69 à 0,85 m/seconde) de la bière dans le TBF peut réduire l'absorption de l'oxygène (1,62 mg O₂/L à 1,02 mg O₂/L).

4.9) Le soutirage

La dissolution de l'oxygène dépend de la conception de la soutireuse, de la longueur des cannules, de la vitesse de remplissage et du type de gaz et pression utilisés lors du soutirage d'après EYBEN et VAN. DROGEN BROEK [22].

4.10) Bière en bouteilles

SOBERKA R., [23] a démontré que l'oxygène dissous dans la bière conservée en bouteille pendant plusieurs semaines réduit le taux d'isohumulones, accroît l'acétaldehyde, le diacétyle et certains alcools supérieurs.



Chapitre IV

Réduction du taux des gaz étrangers dans le produit fini



Introduction

Actuellement, le problème principal de la qualité de la bière est le changement de sa composition chimique au cours du stockage, ce qui altère les propriétés sensorielles. Une variété de saveurs peut survenir, en fonction du type de bière et les conditions de stockage.

En ce qui concerne les autres produits alimentaires, également pour la bière, plusieurs aspects de la qualité peut être sujet à des changements au cours du stockage. La durée de vie de la bière est principalement déterminée par sa microbiologie, la couleur, la stabilité de la mousse et de la saveur...etc.

Donc afin de maîtriser la qualité du produit pendant la conservation et le stockage, il est nécessaire de contrôler certains facteurs qui déclenche certaines réactions d'oxydation et par la suite la perte de la qualité organoleptique de la bière, parmi ces facteurs on peut citer le taux des gaz étrangers dans les bouteilles du produit fini qui contient un volume important d'oxygène, le facteur primordiale d'oxydation.

La société BRANOMA connaît ce problème depuis longtemps ce qui influence l'image de la société chez les clients, et surtout que la société est certifiée iso 22000, en plus l'ouverture du marché national sur d'autres marques étrangères augmente la concurrence, d'où la nécessiter d'améliorer la qualité des produits finis afin de garder sa place dans le marché.

Méthodologie de travail

Afin d'effectuer le présent travail, nous avons procédé de la façon suivante :

- ✓ Description de la problématique
- ✓ Suivi du taux d'oxygène dissous au cours de la fabrication de la bière
- ✓ Interprétation des résultats
- ✓ Recherche des facteurs
- ✓ Optimisation des facteurs

I) Description de la problématique

La bière est un produit obtenue par fermentation du moût de malt, la fermentation se fait en anaérobie c à d en absence d'oxygène, et sa présence dans la bière peut provoquer des dégâts au niveau de la qualité par oxydations de certaines substances. Le produit fini connaît un problème persistant exprimé par une défaillance au cours de sa production présentée par un taux élevé des gaz étrangers qui dépasse 1ml/l. les gaz étrangers sont les gaz présent dans l'air sauf le dioxyde de carbone qui entre dans la préparation de la bière.

Face à ces soucis, on m'a proposé de faire une étude sur le plan processus de fabrication afin d'examiner les facteurs agissants sur le taux des gaz étrangers dans la bière et de proposer des alternatives permettant à BRANOMA de contrôler ces facteurs afin d'améliorer la qualité du produit fini.

Le gaz étranger responsable des réactions d'oxydation est l'oxygène, c'est pour cette raison qu'il est nécessaire de le contrôler tout au long de la chaîne de fabrication, afin de déterminer les zones d'injection et de trouver les facteurs influents.

II) Evolution du taux d'oxygène dissous au cours de la fabrication de la bière

1) Matériels et méthodes

L'évolution du taux d'oxygène dissous dans la bière dépend de plusieurs facteurs, et pour les déterminer un diagnostic sera nécessaire. Ce diagnostic à été fait dès la préparation du moût jusqu'à soutirage dont le but de déterminer l'effet de chaque étape sur la variation du taux d'oxygène dissous.

Pour faire ce suivi, on a besoin d'un orbisphère, appareil qui permet de mesurer le taux d'oxygène dissous. La mesure se fait en réglant d'abord le débit à 100ml/min puis on note pour chaque minute la variation du taux d'oxygène dissous apparue sur l'écran de l'orbisphère jusqu'à l'obtention d'une valeur fixe, c'est la valeur du taux d'oxygène dissous dans la bière en ppm ou en ppb.



Figure 2 : appareil de mesure du taux d'oxygène dissous dans la bière « orbisphère »

Pour mesurer le taux des gaz étrangers dans les bouteilles de la bière (headspace), on procède à la méthode suivante : On fait passer le « headspace » tout entier dans une burette à gaz remplie de



lessive de potasse en frappant sur la bouteille avec un objet dur. Le gaz carbonique du headspace est fixé par la lessive de potasse, on lit la teneur en gaz étranger dans la burette.

Le taux des gaz étrangers égale :

$$1,3 * \frac{1000}{v} * a \text{ ml de gaz/l}$$

Avec :

- ✓ v : nombre de ml de la bière dans la bouteille
- ✓ a : nombre de ml de gaz étranger lu dans la burette
- ✓ le facteur 1,3 n'est valable qu'entre 18 et 22°C et lorsque le volume de la phase gazeux est de 5 à 6%.

2) Suivi du taux d'oxygène au cours de la fabrication de la bière

Le suivi a été fait pour différent cuve afin d'avoir une idée claire et globale sur l'évolution du taux d'oxygène dissous dans la bière, et de déterminer les principaux facteurs qui influent cette évolution, et on a pris le suivi de la cuve 17 comme exemple.

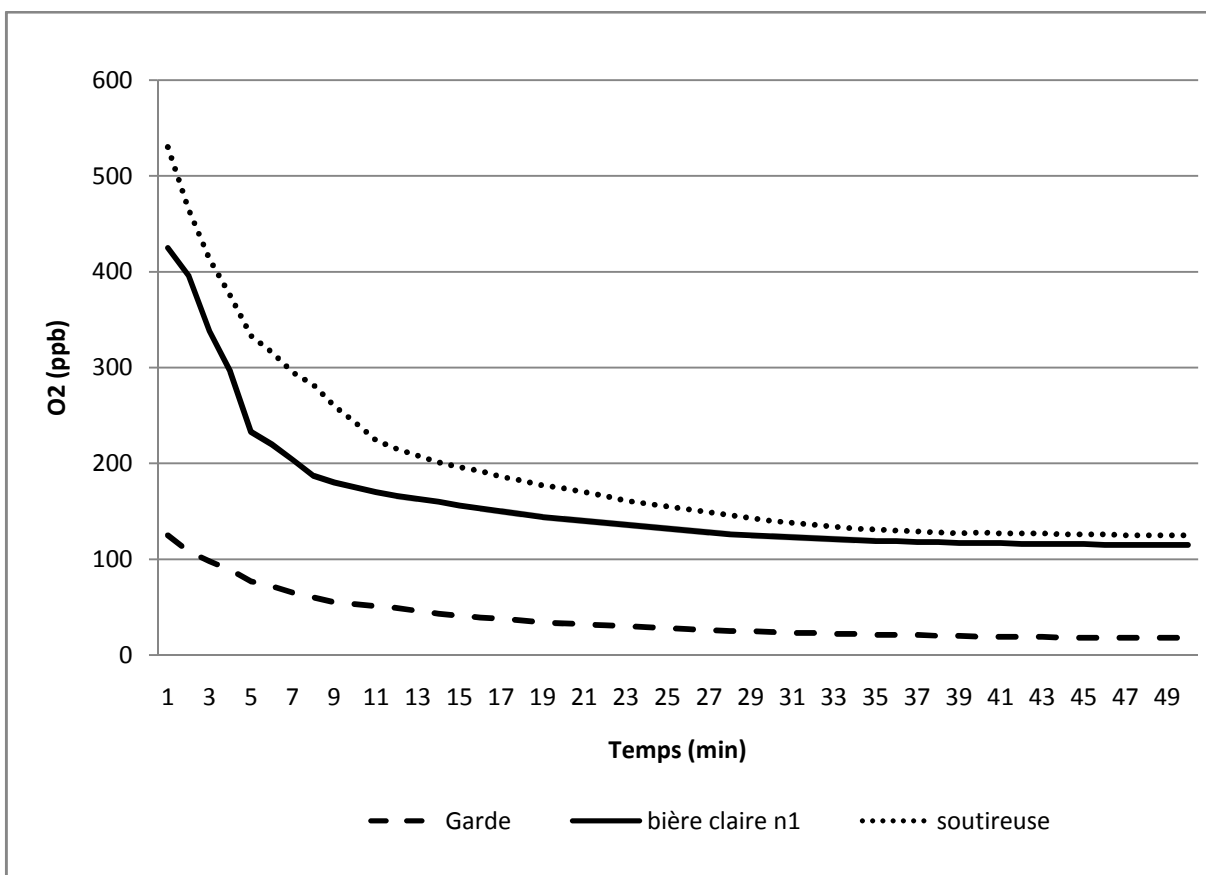


Figure 3 : Suivi du taux d'oxygène de la cuve N° :17



Le suivi du taux d'oxygène dissous dans la bière reste incomplet, et il faut le compléter par la mesure du taux des gaz étrangers au niveau du produit fini, pour qu'on puisse déterminer le degré d'influence d'oxygène sur la qualité de la bière. La valeur des gaz étrangers ne doit pas dépasser le 1ml/l. le tableau ci-dessous présente une mesure qui a été effectuée sur une série d'échantillons (bouteilles).

Tableau 9: Suivi du taux des gaz étrangers dans le produit fini pendant le mois 4/2012

N° d'échantillons	Taux des gazes étrangers (ml/l)	N° d'échantillons	Taux des gazes étrangers (ml/l)
1	1,57	10	1,84
2	1,44	11	1,53
3	1,42	12	1,75
4	1,21	13	1,71
5	1,84	14	1,86
6	1,86	15	1,95
7	1,3	16	1,52
8	1,94	17	1,71
9	1,8	18	1,75

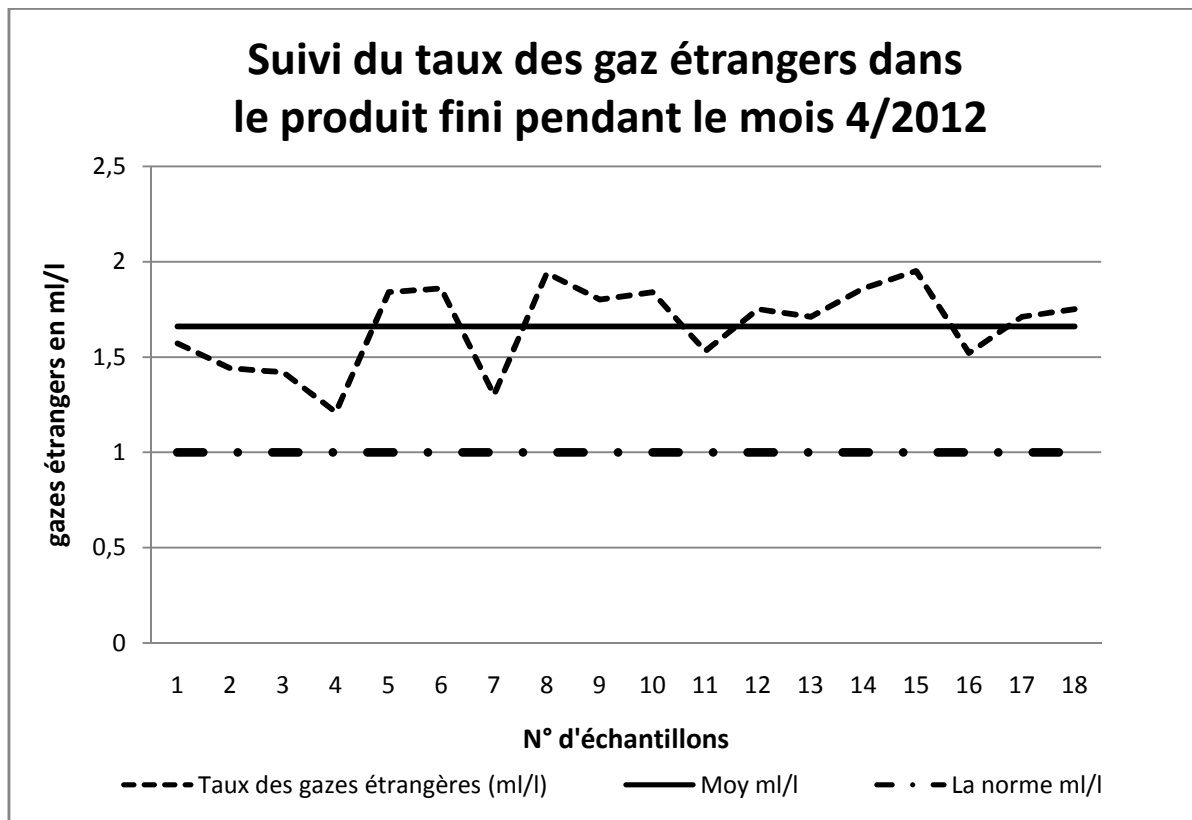


Figure 4 : Suivi du taux des gaz étrangers dans le produit fini

Pour avoir une idée claire et précise sur les principaux facteurs qui influent la variation du taux d'oxygène dissous au cours de la chaîne de fabrication de la bière et de connaître les étapes critique qui facilite l'injection de l'oxygène dans la bière, on a effectué une série de mesure pour différent cuve, le résultat obtenu est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 10: Les résultats de suivi du taux d'oxygène dissous et des gaz étrangers:

N° de la cuve	Le taux d'oxygène dissous					Gaz étrangères dans le produit fini (ml/l)	Taux d'oxygène dans le produit fini (ml/l)
	Le moût (ppm)	La garde (ppb)	L'eau de coupage (ppm)	Bière claire (ppb)	Entrée de la soutireuse (ppb)		
12	-	32	15	107	130	2,03	0,42
13	84	28	15,1	58	85	1,53	0,32
16	-	28	16,3	90	115	1,47	0,30



17	-	18	18,4	115	125	1,74	0,365
----	---	----	------	-----	-----	------	-------

3) L'interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus on peut tirer les remarques suivantes :

- ✓ Le taux d'oxygène dissous dans le moût est très important, car le moût a été aéré pour assurer une bonne multiplication de la levure.
- ✓ Pendant la période de garde le taux d'oxygène diminue jusqu'à des valeurs minimale, ce qui est expliqué par la consommation d'oxygène par la levure au début de fermentation et précisément pendant la phase de respiration qui permet sa croissance et sa développement.
- ✓ Au niveau de la bière claire, il y a une augmentation importante du taux d'oxygène due essentiellement à la méthode de coupage et de filtration, mais il reste toujours dans les normes.
- ✓ Ainsi on distingue une large différence entre le taux d'oxygène dissous mesurer à l'entrée de la soutireuse et le taux des gaz étrangers dans le produit fini dont l'oxygène est parmi ses principaux constituants , ce qui nous informe qu'il ya une défaillance au niveau de la soutireuse.

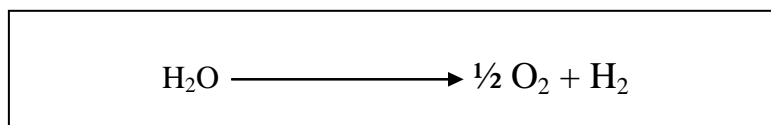
Parmi les différents facteurs qui peuvent expliquer la variation du taux d'oxygène dissous au cours de la fabrication de la bière, on peut citer :

a) La souche et l'âge de la levure

Les résultats obtenus montrent que l'oxygène dissous du moût est réduit rapidement par la levure, c'est-à-dire les valeurs initiales disparaissent complètement après la fermentation. Les travaux de SOBERKA et WARZECHA [24] ont montrés que la réduction de l'oxygène dissous du moût en fermentation est favorisée par une dose de levure et une température plus élevées, ainsi que par une levure jeune. Cette réduction dépend également de la souche de levure, des besoins en oxygène de la levure et de la composition du moût.

b) Méthode de coupage (dilution)

La méthode de coupage ou dilution est une méthode qui permet de passer d'une bière de haute densité (14° plateau) à une bière de 12° plateau pour le type « spéciale », l'eau de coupage utilisé est déjà traité et désaérer, mais malgré ça il contient un taux d'oxygène dissous entre 14 et 19 ppm, qui peut être expliqué par la décomposition d'eau selon la réaction suivante :



c) Filtration de la bière claire à l'aide de la suspension aqueuse de Kieselguhr



Une suspension de kieselguhr, même préparée avec de l'eau ayant une faible quantité d'oxygène dissous présente un taux élevé d'oxygène. Cet accroissement d'oxygène est dû principalement à l'oxygène introduit par le kieselguhr (Oxygène emprisonné dans les pores). La température, et le mode de remplissage de l'alluvionneur, ainsi que l'agitation ont une influence sur l'absorption de l'oxygène par l'eau et la suspension de kieselguhr. Lors de la filtration de la bière, il y'a intérêt de garder un volume constant de suspension, afin d'éviter une reprise importante d'oxygène par la bière car si par hasard la vidange de l'alluvionneur est totale, la pompe doseuse peut aspirer l'air et l'injecter dans la bière.

Conclusion :

D'après le suivi du taux d'oxygène dissous au cours de la chaîne de fabrication de la bière et le taux des gaz étrangers dans le produit fini, on a constaté que le soutirage est l'étape critique qui permet l'enrichissement de la bière par les gaz étrangers et surtout l'oxygène. Donc c'est à ce niveau qu'il faut intervenir pour déterminer les différents facteurs de soutirage afin de les contrôler et de les optimiser pour avoir un produit de bonne qualité qui peut être stocker pendant une longue durée.

III) Technique de soutirage

Le soutirage consiste à remplir la bière dans les bouteilles, ce remplissage doit être fait sans qu'il y ait un contact entre la bière et l'air ambiant, c'est pour cette raison qu'il faut suivre de manière efficace chaque étape du cycle de remplissage, et chaque défaillance peut provoquer l'injection d'air et par la suite l'augmentation du taux des gaz étrangers dans le produit fini, selon le type de la soutireuse utilisée à BRANOMA, on a le cycle de remplissage suivant :

- Après le lavage des bouteilles, à l'entrée de la soutireuse la bouteille pris sa place sur la glissière pour assurer une bonne étanchéité.
- La bouteille est déjà remplie par l'air, donc il faut l'aspirer par la création d'un premier vide où pré-vide.
- Ensuite on injecte le CO₂ dans la bouteille ou ce qu'on appelle un balayage au CO₂.
- Après il faut créer un deuxième vide ou (le vide) pour éliminer le CO₂.
- Ensuite on injecte le CO₂ pour créer une contre pression, c'est la mise en pression de la bouteille.
- Le remplissage utilisé est le remplissage à niveau, la bière s'écoule sur les parois internes de la bouteille, et le remplissage se fait du bas en haut de manière à pousser de dioxyde de carbone qui s'échappe par un tube intérieur.



Le remplissage se termine par un débordement de la bouteille grâce au CO₂ contenue dans la bière. Cette étape est soutenue par un jet d'eau ou mousseur qui permet d'éliminer les gaz contenues dans le col de la bouteille.

IV) Détermination des facteurs influents

1) Diagnostic par la méthode de brainstorming

Pour le diagnostic, on a choisi la technique de brainstorming afin de faire sortir les différentes causes qui peuvent être à l'origine de l'anomalie.

Le brainstorming ou remue-méninges est une technique de résolution créative de problème sous la direction d'un animateur, un remue-méninge étant plus spécifiquement une réunion informelle de collecte d'idées. Elle a été conçue en 1935 par Alex Osborn, vice-président de l'agence de publicité américaine BBDO. Elle permet de produire un maximum d'idées en un minimum de temps.

On a procédé par poser des questions aux différents opérateurs et intervenants dans la chaîne de production de la bière, et on a pu relever les causes suivantes:

- L'étanchéité de la bouteille pendant le remplissage
- CO₂ contre pression
- Pression CO₂ débitmètre
- Pression du mousseur
- Position du mousseur
- Pression d'évacuation
- Pression de la bière au niveau de la soutireuse
- Pression de la bière à l'entrer de la soutireuse
- La pureté de CO₂
- Pression des vérins
- Fuite due à la tuyauterie
- Performance de la pompe
- Défauts de bouchage
- Taux d'O₂ dissous dans la bière
- Taux de CO₂ dissous dans la bière
- Communication entre les personnels
- Variation de T°C de procès
- Qualité d'eau de coupage



- Inattention des opérateurs

2) Diagramme d'ISHIKAWA

Le diagramme d'Ishikawa est également appelé le diagramme causes-effet, le diagramme en arête de poisson ou la méthode des 5M.

Les 5 M sont : La main d'œuvre, Milieu, Méthode, Matériel et Matière première.

Le diagramme d'Ishikawa est un outil graphique qui se présente sous la forme d'une arête de poisson. Il permet de visualiser et d'analyser le rapport existant entre un problème (effet) et toutes ses causes possibles.

L'utilisation du diagramme d'Ishikawa présente les avantages suivants:

- Il permet de classer les causes liées au problème posé.
- Il permet de faire participer chaque membre de l'équipe à l'analyse.
- Il permet de limiter l'oubli des causes par le travail de groupe.
- Il permet de fournir des éléments pour l'étude de ou des solutions.

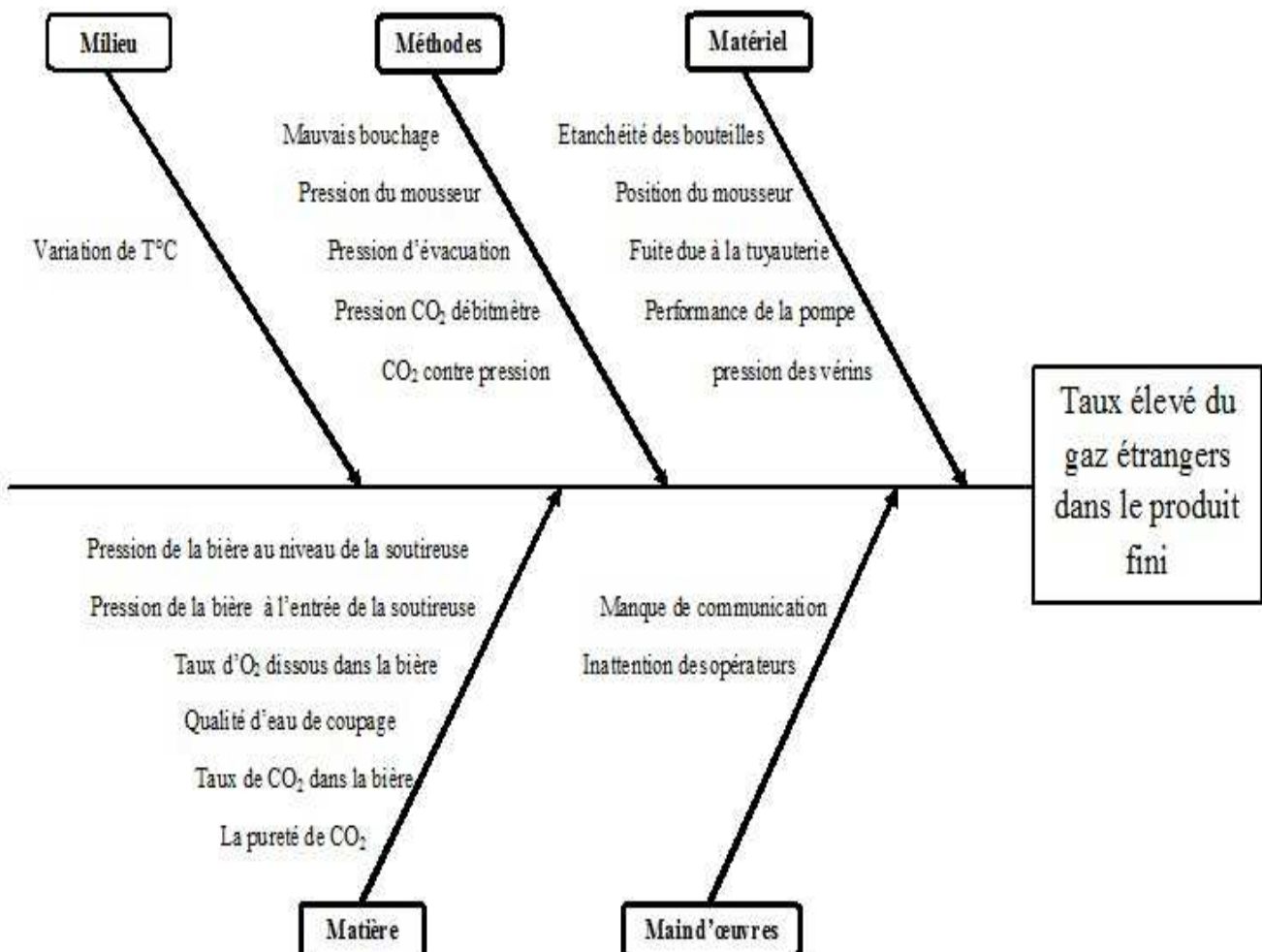




Figure 5 : Diagramme de causes- effets « Ishikawa »

Ce diagramme nous informe sur les causes possibles de défaillance constatée cependant il ne nous renseigne pas sur la gravité de ces causes d'où la nécessité d'avoir recours au modèle de Pareto.

V) Optimisation des facteurs et proposition des solutions.

1) Diagramme de Pareto

Le diagramme de Pareto est également appelé règle des 80/20 ou courbe "ABC". Ce diagramme est un graphique à colonnes qui présente les informations par ordre décroissant et fait ainsi ressortir le ou les éléments les plus importants qui expliquent un phénomène ou une situation. Autrement dit, le diagramme de Pareto fait apparaître les causes les plus importantes qui sont à l'origine du plus grand nombre d'effets. Sachant que 20% des causes sont à l'origine de 80% des conséquences. Cette méthode simple, claire et efficace permet la prise de décision par le groupe.

1.1) Quantification des résultats

La première étape de la mise en place de ce modèle est la quantification des causes énumérées, autrement dit, il faut attribuer une note à chaque cause afin de pouvoir les classer suivant leur ordre d'importance. Pour ce faire nous considérerons Trois paramètres qui sont la fréquence d'apparition, la détection et la gravité du problème occasionné.

La fréquence d'apparition : est le nombre de fois où le même problème se reproduit, cette fréquence peut varier de « jamais rencontré » à « plusieurs fois par jour ». La valeur attribuée à la fréquence sera donc proportionnelle à la répétition du problème.

La gravité : est le degré d'importance du problème engendré par la cause en question.

La détection : c'est le niveau de détectabilité de la défaillance par l'opérateur.

Tableau 11 : cotation de Pareto pour la quantification des causes

Cotation	Gravité	Fréquence	Détection
1	Négligeable : Cause passagère	Pratiquement improbable : <1 fois /1 an	A l'œil nu
2	Marginale : Cause intervenant de façon indirecte sur la défaillance	Improbable : <1 fois /6 mois	Par un examen simple ou l'œil de l'expérimenté
3	Grave : Cause intervenant de façon directe sur la défaillance	Rare <1 fois / 3mois	Par un examen détaillé



4	Critique : Le produit est touché de façon directe et presque permanente	Fréquent <1 fois / mois	Par une analyse
5	Catastrophique : Cause principale de la persistance de défaillance	Très fréquent <1 fois / semaine	Indétectable

La quantification des causes d'augmentation du taux des gaz étrangers dans le produit fini nous donne le tableau suivant : la criticité (I)= fréquence*gravité*détection

Tableau 12 : quantification des causes

Cause	Fréquence	Gravité	Détection	I
Matière				
Taux d'O ₂ dissous dans la bière	2	2	3	12
Pression de la bière au niveau de la soutireuse	3	4	2	24
Pression de la bière à l'entrée de la soutireuse	4	2	2	16
Qualité d'eau de coupage	2	3	3	18
Taux de CO ₂ dans la bière	2	3	3	18
Pureté de CO ₂	2	5	3	30
Milieu				
Variation de T° du procès	2	4	2	16
Main d'œuvre				
Manque de communication	2	2	2	8
Inattention des operateurs	2	3	2	12
Méthode				
Mauvais bouchage	3	4	2	24
Pression du mousser	2	3	3	18
Pression d'évacuation	3	5	3	45
Pression CO ₂ débitmètre	3	4	3	36
CO ₂ contre pression	3	5	3	45
Matériel				
Etanchéité de la bouteille pendant le remplissage	2	5	2	20
Position du mousser	3	3	2	18
Fuite due à la tuyauterie	2	4	3	24
Performance de la pompe	2	4	3	24



Pression des vérins	3	4	3	36
---------------------	---	---	---	----

1.2) Traçage du diagramme

Le diagramme de Pareto est un graphique représentant l'importance des différentes causes sur un phénomène. Ce diagramme permet donc de mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effets et ainsi de prendre des mesures ciblées pour améliorer la situation.

Tableau 13 : hiérarchisation des causes

Causes	I	Pourcentage	Cumul
Pression d'évacuation	45	10,13%	10,13
CO ₂ contre pression	45	10,13%	20,26
Pression CO ₂ débitmètre	36	8,11%	28,37
Pression des vérins	36	8,11%	36,48
Pureté de CO ₂	30	6,75%	43,23
Mauvais bouchage	24	5,4%	48,63
Fuite due à la tuyauterie	24	5,4%	54,03
Performance de la pompe	24	5,4%	59,43
Pression de la bière au niveau de la soutireuse	24	5,4%	64,83
Etanchéité de la bouteille pendant le remplissage	20	4,5%	69,33
Taux de CO ₂ dans la bière	18	4,05%	73,38
Pression du mousser	18	4,05%	77,43
Position du mousser	18	4,05%	81,48
Qualité d'eau de coupage	18	4,05%	85,53
Pression de la bière à l'entré de la soutireuse	16	3,6%	89,13
Variation de T° du procès	16	3,6%	92,73
Inattention des operateurs	12	2,7%	95,43
Taux d'O ₂ dissous dans la bière	12	2,7%	98,13
Manque de communication	8	1,8%	99,93
total	444		100%

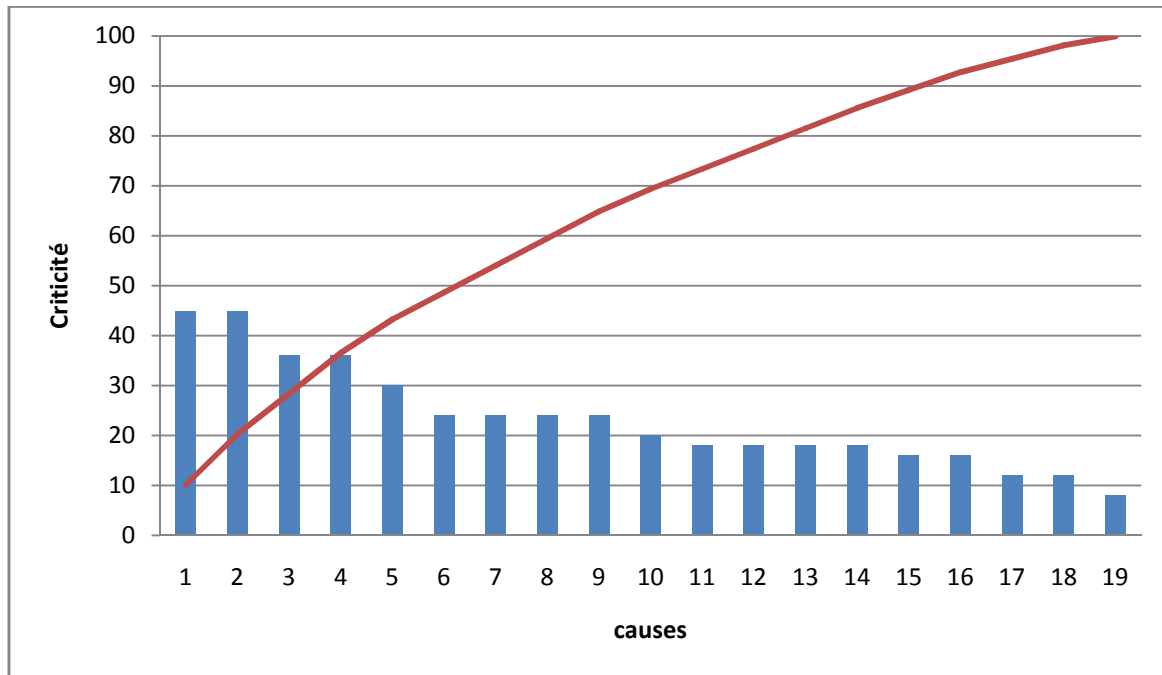


Figure 6 : Diagramme de Pareto

Le diagramme ci-dessus met en évidence la loi de Pareto, en effet on constate que seules quatre causes sont à l'origine de la majorité de défaillance.

2) Plan d'expériences

2.1) Aperçu général

Les plans d'expériences font partie de l'ensemble des outils de la qualité qui permettent aux entreprises de progresser dans la maîtrise de la conception de produits nouveaux et dans la maîtrise des procédés de fabrication. Ils forment avec d'autres outils statistiques un ensemble cohérent d'une redoutable efficacité pour résoudre de nombreux problèmes de qualité. Ignorer ces méthodes aujourd'hui, serait se priver d'un potentiel important d'amélioration pour l'entreprise.

Quel que soit le secteur d'activité et quel que soit l'industriel, on est toujours amené à procéder à des essais pour répondre aux exigences du marché. Or ces essais sont malheureusement trop souvent conduits sans méthode ordonnée et ciblée. On procède sans planification de façon rigoureuse les essais pour obtenir un ensemble de résultats que l'on ne sait pas toujours très bien exploiter.

Cependant, la méthode des plans d'expériences permet de conduire de façon rigoureuse les essais en vue d'un objectif parfaitement défini. Elle permettra, en outre, une diminution considérable du nombre d'essais par rapport aux techniques traditionnelles.

Mais plus encore, elle permettra une interprétation rapide et sans équivoque des résultats des essais en fournissant un modèle expérimental du système étudié.



2.2) Choix des facteurs

Les facteurs qui seront l'objet des plans d'expériences sont ceux qui ont eu le niveau élevé de criticité (les quatre premiers facteurs cités dans le tableau d'hierarchisation ci-dessus).

Or, on s'est basé sur les facteurs qui semblent être réglable, à fin de pouvoir les régler de façon permanente durant les expériences.

Tableau 14 : les facteurs étudiés dans le plan d'expérience

	Facteurs	Centre	Pas de variation	Unité
X1	Pression d'évacuation	-0,9	0,05	Bar
X2	CO ₂ contre pression	3,6	0,1	Bar
X3	Pression CO ₂ débitmètre	5	0,1	Bar
X4	Pression des vérins	3,4	0,2	Bar

2.3) Choix du plan d'expérience

Vu la nature et les caractéristiques des facteurs étudiés, notre choix s'est porté sur un plan factoriel complet à deux niveaux avec interactions. Ce qui va nous donner le tableau suivant.

Tableau 15 : les niveaux choisis des facteurs

	Facteurs	Niveau bas (-1)	Niveau moyen (0)	Niveau (+1)
X1	Pression d'évacuation	-0,85	-0,9	-0,95
X2	CO ₂ contre pression	3,5	3,6	3,7
X3	Pression CO ₂ débitmètre	4,9	5	5,1
X4	Pression des vérins	3,2	3,4	3,6

Les plans factoriels complets à deux niveaux permettent de [25] :

- ✓ Trouver les facteurs influents sur le phénomène
- ✓ Trouver La valeur de l'influence
- ✓ Mettre en évidence Les interactions entre les facteurs

Pour notre cas, on va travailler par un nombre de 16 expériences, car la règle dit que pour un plan factoriel complet on à 2^K expériences avec : 2 : nombre de niveaux



K : nombre des facteurs

Donc on a ($2^4 = 16$) expériences à faire.

2.4) Terminologie des plans d'expériences [25]:

Sous forme mathématique, on peut écrire que la grandeur d'intérêt y , que nous appellerons également réponse, est une fonction de plusieurs variables x_i (variables que nous appellerons aussi facteurs). On a :

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k).$$

L'étude du phénomène se ramène à déterminer la fonction f qui lie la réponse y aux différents facteurs x_1, x_2, \dots, x_k .

Pour approfondir cette approche, il faut introduire quelques notions particulières et une terminologie spécifique aux plans d'expériences.

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de réponse. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes facteur et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

2.5) Réalisation des essais :

La réalisation des essais doit se faire en respectant les conditions expérimentales.

- ✓ Les facteurs doivent être bien aux niveaux préconisés.
- ✓ La réponse (le résultat) doit être donnée avec la plus grande précision.
- ✓ les mesures doivent être réalisées de préférence par le même expérimentateur en cas de répétitions.
- ✓ Traitements statistiques: calcul des effets des facteurs étudiés et de leurs interactions, modélisation, le choix du logiciel ainsi que sa maîtrise sont très déterminant pour la précision et l'interprétation des résultats statistiques.
- ✓ Interprétation des résultats: L'effet propre de chaque facteur est relativement simple à interpréter mais l'effet d'interaction est parfois délicat à expliquer car les causes ne sont pas toujours explicites.
- ✓ La réponse « y » représente le taux des gaz étrangers dans le produit fini, cette valeur doit être inférieure ou proche de 1ml/l.

Après établissement du plan d'expérience, on commence la réalisation des essais dans l'ordre et on note la valeur du taux des gaz étrangers obtenue pour chaque expérience.



Voici au dessous le tableau qui regroupe tous les essais effectués ainsi que la réponse de chaque essai :

Tableau 16: les expériences et les niveaux choisis pour chaque facteur.

N°Exp	Rand	pression d'évacuation	CO ₂ contre pression	pression CO ₂ débitmètre	pression des vérins
		Bar	Bar	Bar	Bar
1		-0.85	3.50	4.90	3.20
2		-0.95	3.50	4.90	3.20
3		-0.85	3.70	4.90	3.20
4		-0.95	3.70	4.90	3.20
5		-0.85	3.50	5.10	3.20
6		-0.95	3.50	5.10	3.20
7		-0.85	3.70	5.10	3.20
8		-0.95	3.70	5.10	3.20
9		-0.85	3.50	4.90	3.40
10		-0.95	3.50	4.90	3.40
11		-0.85	3.70	4.90	3.40
12		-0.95	3.70	4.90	3.40
13		-0.85	3.50	5.10	3.40
14		-0.95	3.50	5.10	3.40
15		-0.85	3.70	5.10	3.40
16		-0.95	3.70	5.10	3.40

Tableau 17 : matrice d'expériences

N°Exp	Rand	pression d'évacuation	CO ₂ contre pression	pression CO ₂ débitmètre	pression des vérins	Taux des gaz étrangers
		Bar	Bar	Bar	Bar	ml/l
1		-0.85	3.50	4.90	3.20	1.90
2		-0.95	3.50	4.90	3.20	1.15
3		-0.85	3.70	4.90	3.20	1.79
4		-0.95	3.70	4.90	3.20	1.18
5		-0.85	3.50	5.10	3.20	1.08
6		-0.95	3.50	5.10	3.20	1.18
7		-0.85	3.70	5.10	3.20	1.86
8		-0.95	3.70	5.10	3.20	1.16
9		-0.85	3.50	4.90	3.40	1.83



10	-0.95	3.50	4.90	3.40	0.98
11	-0.85	3.70	4.90	3.40	1.69
12	-0.95	3.70	4.90	3.40	0.98
13	-0.85	3.50	5.10	3.40	1.77
14	-0.95	3.50	5.10	3.40	1.87
15	-0.85	3.70	5.10	3.40	1.83
16	-0.95	3.70	5.10	3.40	1.11

2.6) Traitement des résultats obtenus :

Une fois on a réalisé les essais industriels prévu, vient l'étape la plus importante qui consiste à traiter les résultats et tirer le maximum d'informations qui vont nous faciliter la compréhension du phénomène étudié et par conséquent la mise en place des actions correctives nécessaires pour remédier la problématique traitée et par conséquent résoudre l'anomalie (sujet du stage).

L'utilisation du logiciel NEMRODW, nous a permis de faire une interprétation pertinente des effets des facteurs étudiés.

a) Etudes graphiques

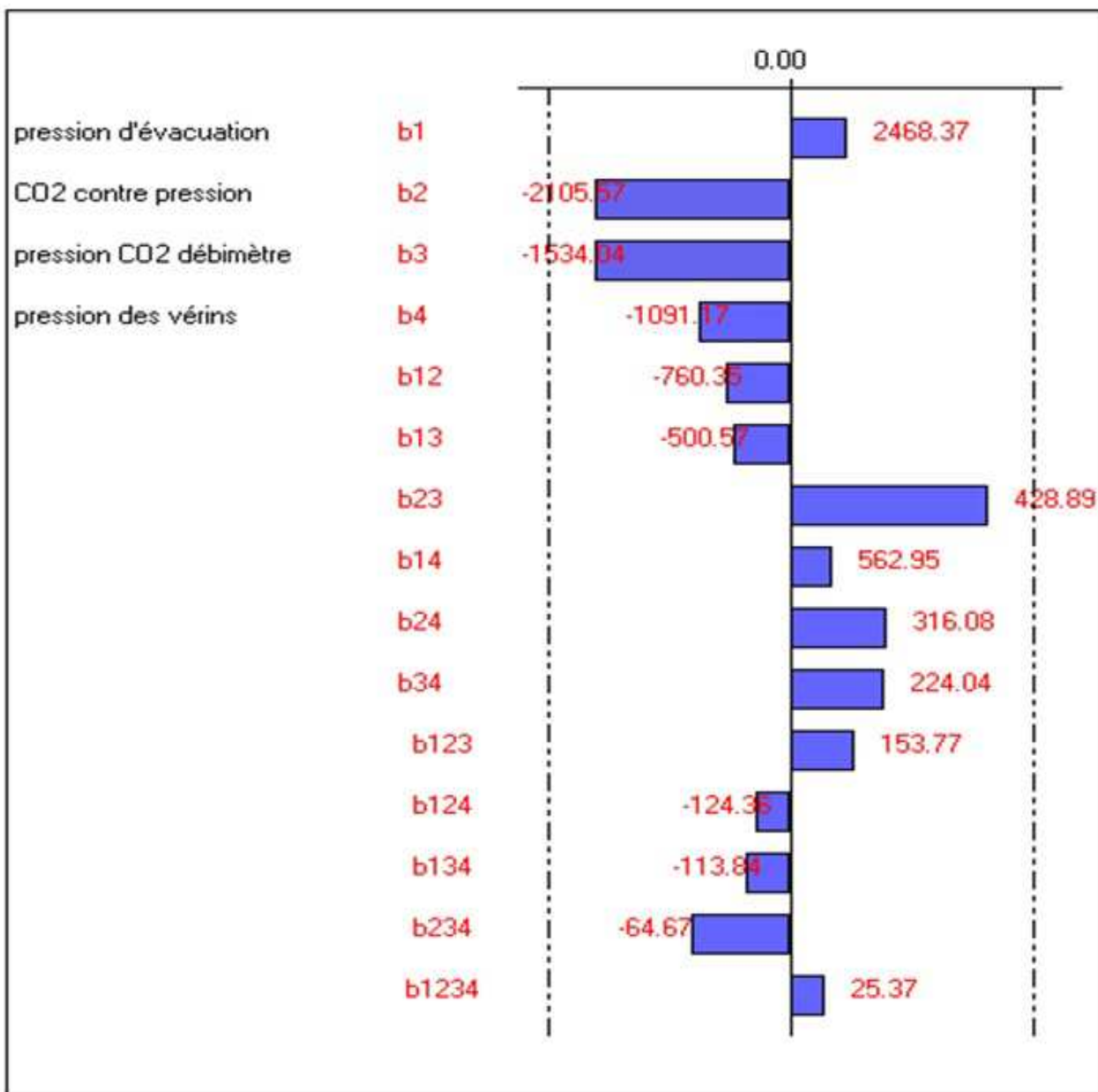


Figure 7 : étude graphique des effets des facteurs étudiés ainsi que leurs interactions

Commentaire:

Selon le graphe ci-dessus on peut dire que l'augmentation du taux des gaz étrangers dans le produit fini peut être engendrée par les facteurs suivants :

- CO₂ contre pression influe de façon significative lorsqu'il est dans le niveau bas (3,5 bar)
- Pression CO₂ débitmètre influe de façon significative lorsqu'il est dans le niveau bas (4,9 Bar)

On peut aussi se baser sur la droite d'HENRY qui sert à déterminer aussi de façon graphique les facteurs qui interviennent de façon significative sur le phénomène étudié à savoir que :

- ✓ les contrastes négligeables qui forment une population moyenne nulle seront alignés.
- ✓ les contrastes significatifs s'écartent de la droite.

N .B:

Le mot contraste est symbolisé par la lettre b, il est calculé de la façon suivante :

$$b1 = 1/16(-y1+y2-y3+y4-y5+y6-y7+y8-y9+y10-y11+y12-y13+y14-y15+y16)$$

Avec y est la réponse de chaque expérience faite de 1 à 16, et on calcule par la suite pour chaque facteur ou interaction le contraste correspondant.

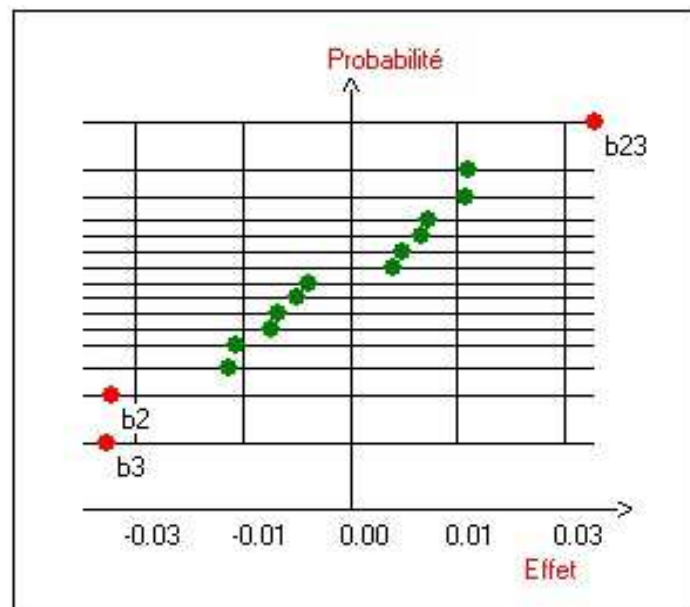


Figure 8 : La droite d'HENRY



Selon la droite d'HENRY on constate que les points qui portent la couleur rouge (b_2 , b_3 et b_{23}) sont ceux qui s'écartent de la droite et par conséquent sont les contrastes correspondants aux facteurs et interactions suivantes :

- b_2 : CO₂ contre pression
- b_3 : pression CO₂ débitmètre
- b_{23} : l'interaction : CO₂ contre pression* pression CO₂ débitmètre

Conclusion :

D'après les tests graphiques cités ci-dessus, on peut dire que l'augmentation du taux des gaz étrangers dans le produit fini est engendré par : le CO₂ contre pression, pression CO₂ débitmètre ainsi que l'interaction : CO₂ contre pression* pression CO₂ débitmètre.

Donc en se basant sur ces résultats graphiques on peut proposer le postulat mathématique qui représente le phénomène étudié.

b) Modèle mathématique proposé :

Un plan factoriel complet à deux niveaux avec 4 facteurs étudié est représenté par l'équation mathématique suivante :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{14}X_1X_4 + a_{23}X_2X_3 + a_{24}X_2X_4 + a_{34}X_3X_4 + a_{123}X_1X_2X_3 + a_{124}X_1X_2X_4 + a_{134}X_1X_3X_4 + a_{234}X_2X_3X_4 + a_{1234}X_1X_2X_3X_4.$$

Avec :

- ✓ a_0 : la valeur moyenne des réponses : $\Sigma y_i / 16$
- ✓ $a_1, a_2, a_3,$ et a_4 : sont appelés effets principaux des facteurs de réponse
- ✓ $a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{23}, a_{24}, a_{34}, a_{123}, a_{124}, a_{134}, a_{234}, a_{1234}$: appelés effets d'interactions

Exemple de calcul :

Pour $a_1 = (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8 - y_9 + y_{10} - y_{11} + y_{12} - y_{13} + y_{14} - y_{15} + y_{16}) / 16$

$a_1 = (-1,9 + 1,15 - 1,79 + 1,18 - 1,08 + 1,18 - 1,86 + 1,16 - 1,83 + 0,98 - 1,69 + 0,98 - 1,77 + 1,87 - 1,83 + 1,11) / 16$

$a_1 = -0,255$

N.B :

- Les signes (- et +) sont les signes correspondantes à chaque expérience pour chaque facteur.
- Pour les interactions, les signes utilisés sont les produits des signes des différents facteurs présentés dans l'interaction en question.
- Les contrastes (b_1, b_2, \dots) cités dans la droite d'HENRY sont équivalents aux effets (a_1, a_2, \dots).



Par la même méthode de calcul citée ci-dessus on trouve :

$a_0 = 1,5225$	$a_{23} = 0,0175$
$a_1 = -0,255$	$a_{24} = -0,095$
$a_2 = -0,01$	$a_{34} = 0,115$
$a_3 = 0,0225$	$a_{123} = 0,11$
$a_4 = 0,0475$	$a_{124} = 0,00125$
$a_{12} = -0,08$	$a_{134} = 0,0112$
$a_{13} = 0,106$	$a_{234} = -0,0875$
$a_{14} = 0,0487$	$a_{1234} = -0,00125$

Après avoir calculé le modèle qui explique le phénomène. Pour cela on va se concentrer sur les effets des interactions, et on ne va prendre en considération que les effets des facteurs et des interactions significatifs déjà relevés à partir des tests graphiques, ce qui va nous donner l'équation modèle finale suivante :

thématique modèle qui

Jusqu'à ce moment des facteurs adoptés.

$$Y = 1,5225 - 0,01X_2 + 0,0225X_3 + 0,0175X_2X_3$$

effets significatifs plan d'expérience

c) Proposition du réglage nécessaire:

D'après l'étude graphique (figure 6) effectuée grâce au logiciel NEMROD, on a constaté que l'augmentation du taux des gaz étrangers dans le produit fini est influencée plus précisément par la pression du CO₂ débitmètre (niveau bas) et CO₂ contre pression (niveau bas), donc pour diminuer le taux des gaz étrangers et avoir une valeur minimale on doit maintenir ces deux facteurs au niveau haut. C'est pour cette raison qu'on a proposé le réglage suivant :

- Pression d'évacuation doit être au centre (-0,90 Bar)
- CO₂ contre pression doit être au niveau haut (3,7 Bar)
- Pression CO₂ débitmètre doit être au niveau haut (5,1 Bar)
- Pression des vérins doit être au centre (3,3 Bar)

CONCLUSION GENERALE:

Le traitement des défaillances au niveau de la production en utilisant la méthode des plans d'expériences est considérée actuellement le moyen le plus



efficace disponible dans l'industrie agro-alimentaire pour assurer une optimisation de production.

Au cours de ce stage, j'ai pu découvrir l'univers de la société et plus précisément le service production. La réduction du taux des gazes étrangers dans le produit fini a enrichi mon expérience professionnelle et m'a permis également d'avoir une vision détaillée sur la démarche suivie pour corriger un problème au niveau de la chaîne de fabrication.

La réduction du taux des gaz étrangers dans le produit fini permet de garantir une meilleure conservation de la bière pendant une longue durée et pour bien maîtriser le taux des gazes étrangers et le taux d'oxygène dissous dans la bière, les recommandations suivantes me semblent très utiles :

- ✓ Il faut vérifier l'étanchéité des circuits pour éviter l'injection d'air au niveau des tuyaux.
- ✓ Il faut vérifier la performance des pompes et surtout la pompe à vide.
- ✓ Il faut changer la méthode de coupage après la phase de garde, par un coupage pendant le brassage, car l'eau de coupage contient au taux élevé d'oxygène dissous d'où son augmentation dans la bière.
- ✓ Il faut vérifier continuellement la pureté de CO_2 qui doit être de 100%.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Caporale G. & Monteleone E., 2004. Influence of information about manufacturing process on beer acceptability.
- [2] : DE JOUFFROY D'ABBANS ISABELLE: Cidre - bière et autres boissons familiales PARIS 1977.
- [3] : ROUILLER MONIQUE: Appréciation des orges, du malt et de la bière, VANDOEUVRE 1986.
- [4]: MOLL Manfred (1991): Beer and Coolers - Edition TEC et DOC. LAVOISIER.
- [5]: PROTZ (1995) : Le "Business" de la bière - Encyclopédie de la bière, Editions de L'Olympe.
- [6] : DE CLERCK Jean: Cours de Brasserie Vol. 1 : matières premières, Fabrication, installations. Louvain 1980 - BELGIQUE.
- [7]: HOPKINS R. ET KRAUSE B.: Biochemistry of malting and Brewing London 1937.
- [8]: HELL Bertrand (1981) : L'homme et la bière, coll. Au souffle du terroir, Éditions Jean-Pierre Gyss, 1981.
- [9]: BALLAT Léon (1998) : A la découverte de la bière - Syndicat des Brasseurs de la région du Nord de la France.
- [10] : BOURGEOIS C.M. ET LEVEAU J. Y. (Coordonnateurs) : Techniques d'analyses et de contrôle dans les industries agro-alimentaires, Volume 3, Contrôle microbiologique Technique et Documentation PARIS 1980.
- [11] : Bartowsky E.J. & Henschke P.A., 2004. The buttery attribute of wine-diacetyl-desirability, spoilage and beyond. Int. J. Food Microbiol.
- [12]: Fleet G.H. & Heard G.M., 1992. Growth during fermentation. In: Fleet G.H., ed. Wine microbiology and biotechnology. Newark, NJ, USA: Harwood Academic Publishers.
- [13]: Jolly N.P., Augustyn O.P.H. & Pretorius I.S., 2006. The role and use of non-Saccharomyces yeasts in wine production. S. Afr. J. Enol. Vitic.
- [14]: Glazer A.N. & Nikaido H., 2007. Ethanol. In: Microbial biotechnology: fundamentals of applied microbiology. Berkeley, CA, USA: Cambridge University Press.
- [15]: Lodolo E.J., Kock J.L., Axcell B.C. & Brooks M., 2008. The yeast *Saccharomyces cerevisiae*-the main character in beer brewing. FEMS Yeast Res.
- [16] : DE CLERCK Jean et H. VAN CAUWENBERGE : Bulletin de l'Association des Anciens étudiants en Brasserie de l'Université Catholique de Louvain (52) 1956, BELGIQUE.
- [17] : (GAY, 1971) : Voici comment on fabrique la bière - Edition La Planète.



-
- [18]: LIE ET COLL: Proceedings of the european brewery convention (EBC) 16 th congrès Amsterdam 1977.
- [19] : DESRONE ET COLL : Bios. 1981 n° 4 p. 21
- [20] : VAN LAER ET ROZENTHAL : Annalles des fermentations 1937.
- [21]: KIRSOP B.H.: Technical quarterly MBAA 1977 (14) n° 4.
- [22] : EYBEN ET VAN DROGEN BROEK : Fermentation 1969.
- [23]: SOBERKA RICHARD: Brasserie – Malterie – Boissons et Conditionnement, Bios, 1973, n° 7-8.
- [24]: SOBERKA R. ET WARZECHA A.: Influence of certain factors on the level of oxygen dissolved during beer manufacture (Part 4, concluded), 1987.
- [25]: Cours : plan d'expériences, Pr. E.M.EL HADRAMI, année universitaire : 2010-2011.