

UNIVERSITE MARIEN NGOUABI

Faculté des Sciences
Formation Doctorale :
Transformation Alimentaire
des Agroressources

Année : 2006

N° d'ordre : 044/UMNG-VR-DR

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Marien NGOUABI

Domaine

Sciences Exactes, Naturelles et de l'Ingénieur

Spécialité

Microbiologie et Biochimie Alimentaires

présentée et soutenue publiquement
par

Philippe DIAKABANA,

Attaché de Recherche, Délégation Générale à la
Recherche Scientifique et Technologique

le 20 février 2006 à Brazzaville

OPTIMISATION DU PROCÉDE TRADITIONNEL DE PRODUCTION DE BOGANDA, UNE EAU-DE-VIE DU CONGO

Directeur de thèse

LOUEMBE Delphin, Maître de Conférences C.A.M.E.S.,
Faculté des Sciences, Université Marien NGOUABI

JURY

Président : DIATEWA Martin,

Professeur Titulaire, Université Marien NGOUABI,
Brazzaville – Rapporteur ;

Membres : CHALCHAT Jean Claude,

Professeur, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand
– Rapporteur ;

KABELE NGIEFU,

Professeur Emérite, Université de Kinshasa, Kinshasa ;

LOUEMBE Delphin,

Maître de Conférences, Université Marien NGOUABI,
Brazzaville ;

KOBAWILA Simon Charles,

Maître de Conférences, Université Marien NGOUABI,
Brazzaville.

*A notre défunt père **Philippe KIYINDOU,***

*A notre défunte mère **Marie MBEKA,***

*A notre défunte sœur **Bernadette MANTOUADI,***

*A notre défunt frère **Jean MAKOUANGOU,***

Nous dédions ce travail.

Avant propos

Au terme de notre cycle de formation doctorale, nous tenons à remercier très sincèrement tout le personnel académique, scientifique et administratif de la Faculté des Sciences de l'Université Marien NGOUABI.

Nous adressons très sincèrement nos remerciements à Monsieur le Délégué Général à la Recherche Scientifique et Technologique, le Professeur A.ITOUA-NGAPORO, pour ses encouragements concernant la poursuite des travaux sur le Boganda.

Notre reconnaissance va à l'endroit du Professeur Thomas SILOU, Coordonnateur de la Formation Doctorale "Transformation Alimentaire des Agroressources, pour l'ouverture de cette opportunité visant la formation initiale et continue des chercheurs dans ce domaine tant prometteur en Afrique.

Notre profonde gratitude va en particulier au Professeur Delphin LOUEMBE, qui a bien accepté d'encadrer et de diriger notre travail.

Que Messieurs les Professeurs Guy DERDELINCKX (Université de Leuven), Simon Charles KOBAWILA (Université Marien NGOUABI) et Jean-Claude CHALCHAT (Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand), pour leurs sages conseils, trouvent ici notre expression d'une sincère reconnaissance.

Aux Docteurs Gaston Gabriel ELLALY, Antoine OUABONZI, Pierre BANGTABA, OSSEBI ACKONDJO et Bedel Gaston ITOUA (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technologique), Antoine MATONDO, Alphonse NGAKA et Messieurs Ignace ILOKI et Victor MAMONEKENE (Université Marien NGOUABI), pour leur franche collaboration, nous adressons nos remerciements et nos amitiés les plus sincères.

Nous n'oublions pas tous les collaborateurs du Centre de Recherche et d'Initiation des Projets de Technologie (C.R.I.P.T.) et tous les producteurs du Boganda : qu'ils trouvent ici nos sincères amitiés.

Quant à notre frère Philippe BAKALA, qu'il daigne croire à notre gratitude pour son aide morale et financière soutenue.

A ma femme Léonie BANKOUNA pour son soutien moral et matériel,

A nos fils Loïc Jean-Philléons et Léodet Vulgrin,

A notre frère Gérard KIYINDOU SOUDANT,

A notre neveu, le Docteur Arland LOUNANGOU KIYINDOU,

A nos sœurs, neveux et nièces,

A toute la famille paternelle,

A toute la famille maternelle,

que ce travail soit, pour vous tous, un symbole manifeste d'affection et de confiance réciproque.

Nous tenons à remercier tous nos amis qui nous ont soutenu de près ou de loin tout au long de notre travail.

Brazzaville, le 1^{er} décembre 2005

PH.D.

Table des matières

Introduction.....	6
I- Le <i>boganda</i>	7
Matières premières pour la fabrication du <i>boganda</i>	7
1-Le maïs et son maltage.....	7
2. Le manioc et sa transformation en <i>foufou</i>	8
2.1- La racine de manioc.....	8
2.2. - La transformation de la racine de manioc en <i>foufou</i>	9
3- L'eau.....	9
II- Problématique.....	10
Chapitre 1 :Aspects généraux sur les fermentations	11
1-Production de la matière première	12
2-Transformation de la matière première en jus fermentescible.....	12
2.1- Dégradation biologique de l'amidon.....	13
2.1.1-Amidon.....	13
2.1.2.dégradation biologique de l'amidon.....	14
2.1.3. Action des enzymes amylolytiques.....	16
3. Fermentation	18
3.1 Aspects biochimiques.....	18
3.2- Aspects microbiologiques	19
3.3-Dégradation du glucose et formation du pyruvate	20
3.4- Destinées du pyruvate dans le processus de fermentation alcoolique.....	24
3.5 - Influence des paramètres physiques, physicochimiques et biochimiques sur la fermentation éthylique.....	26
4- Distillation.....	27
Chapitre 2 : Matériel et méthodes.....	29
1 - Equipements de fabrication.....	30
1.1 - Equipements du maltage traditionnel de maïs.	30
1.2 - Fermenteur.....	30
1.3 - Distillateur	31
2 - Matériel biologique.....	33
2.1 - Le maïs.....	33
2.2 - Le <i>foufou</i>	33

2.3 - La levure de boulangerie.....	33
3. Milieux de culture.....	33
3.1. La gélose nutritive enrichie à l'amidon avec 0,5% de chloramphénicol.....	33
3.2. Milieu PDA (Potato Dextrose Agar).....	33
4. Méthode d'enquête.....	34
4.1 - Population cible.....	34
4.2. Echantillonnage.....	34
4.3. Collecte des informations	34
5 - Méthode de production	34
5.1 - Le maltage	34
5.1.1- Le trempage.....	34
5.1.2- La germination	35
5.1.3- L'étouffement des grains germés.....	35
5.1.4- Le séchage du malt.....	35
5.2 - La fermentation	35
5.2.1- Préparation des ingrédients.....	35
5.2.2- La fermentation proprement dite.....	36
5.3 La distillation.....	36
6. Méthodes d'analyses.....	37
6.1. Evaluation des paramètres physicochimiques.....	37
6.1.1. Température.....	37
6.1.2- Détermination du taux d'humidité et de la matière sèche.....	37
6.1.3- Détermination de la masse de 1000 grains secs.....	38
6.1.4- Evaluation du nombre de grains de malt plongeurs.....	38
6.1.5- Détermination du taux et de la vitesse d'absorption d'eau par les grains.....	38
6.1.6- Détermination du taux germination et de la vitesse de germination.....	39
6.1.7- Détermination de la longueur des organes de croissance.....	39
6.1.8- Détermination de la densité du moût en fermentation	40
6.1.9- Détermination du pH au cours de la fermentation.....	40
6.1.10- Détermination de la turbidité de <i>boganda</i>	40
6.2 - Evaluation des paramètres biochimiques.....	41
6.2.1- L'acidité titrable.....	41
6.2.2- L'acidité volatile.....	41
6.2.3- Détermination des composés organiques.....	41

6.2.4- Dosage de l'amidon du moût.....	42
6.2.5- Dosage de l'activité α -amylasique du malt de maïs	43
6.2.6- Evaluation de la saccharification.....	43
6.2.7- Détermination de la teneur en éthanol.....	43
6.2.8. Détermination du rendement de transformation d'amidon.....	44
a-Evaluation du rendement de consommation d'amidon.....	44
b-Evaluation du rendement de conversion d'amidon en éthanol.....	44
6.2.9. Détermination de la productivité en éthanol.....	45
6.3. Analyse microbiologique.....	45
Dénombrement des microorganismes après culture sur milieu solide :.....	45
6.4 Analyse Statistique :.....	46
7- Test de dégustation du <i>boganda</i>	46
Chapitre 3 : Résultats	48
I-Etude des paramètres caractéristiques de la méthode traditionnelle de production du <i>boganda</i>	49
A.Paramètres socio-économiques.....	49
B- Paramètres technologiques.....	50
1-Matières premières.....	50
2 - Procédés technologiques.....	51
2.1 - Qualité du maïs.....	51
2.2 - Etapes du procédé.....	52
a) - Maltage de maïs.....	52
a.1) Le trempage du maïs.....	52
a.2) La germination du maïs.....	53
a.3)- Le séchage.....	54
b) - Fermentation de la bouillie de <i>foufou</i>	54
c) - Distillation du moût fermenté.....	56
3. Variabilité entre différents ateliers de production.....	59
3.1- Qualités physicochimiques du <i>boganda</i>	59
3.2. Composition biochimique du <i>boganda</i>	60
3.3- Qualités sensorielles.....	61
4 - Variabilité des opérations au sein d'un atelier.....	62

4.1 -Qualité de matières premières.....	62
4.2- Quantité de matières premières.....	64
4.3- Le trempage.....	64
4.4- La germination.....	64
4.5- L'étouffement.....	64
4.6 - Préparation de la pâte de fufou.....	65
4.7- La fermentation.....	66
4.8 - La distillation.....	68
II- Optimisation des conditions de production du <i>boganda</i>	72
A -Maltage du maïs.....	72
1-Evolution de l'absorption d'eau des grains au cours du trempage du maïs.....	72
2-Evolution du pH au cours du trempage.....	74
3.Influence du mode de trempage sur la germination des grains de maïs.....	76
4 -Influence du mode de trempage sur le développement des organes de croissance au cours de la germination du maïs.....	78
5 - Etouffement de grains germés.....	79
6- Développement de l'activité α - amylasique au cours du maltage.....	81
B- Optimisation de la conduite de la fermentation.....	82
1- Evolution du moût en fonction de la teneur en fufou au cours de la fermentation.....	82
2 - Evolution de la fermentation en fonction de la teneur en malt, suivant le ratio α -amylase/amidon.....	88
3 - Importance du levurage du moût sur le déroulement de la fermentation.....	90
4 - Effet du pied de cuve sur l'acidification au cours de la fermentation du moût.....	94
5 - Transformation de l'amidon au cours de la fermentation du moût de <i>boganda</i>	95
6 - Effet du levurage sur l'acidité volatile et la productivité de la fermentation éthanolique.....	96
7- Importance du levurage sur la composition du <i>boganda</i> en substances organiques volatiles.....	97
Chapitre 4 : Discussions.....	100

Conclusions et perspectives.....	106
Bibliographie.....	111
Annexes.....	120
Résumé.....	145

Introduction

I- Le boganda

Parmi les boissons alcooliques produites au Congo figure le *boganda*, un alcool traditionnel très consommé comme alcool de bouche. Il est produit par des méthodes artisanales tant en zones rurales qu'urbaines à partir du fougou, une farine de racine de manioc (*Manihot esculenta* sp.) rouie et séchée et de maïs (*Zea mays* sp.) germé. Les produits obtenus selon ces méthodes artisanales sont d'une grande variabilité qualitative. Le rendement obtenu est souvent faible et la qualité médiocre. Cet alcool de bouche est également produit dans d'autres pays de l'Afrique Centrale où il est différemment nommé : le "*lotoko*" au Congo Démocratique et le "*ngbako*" en Centrafrique .

Matières premières pour la fabrication du boganda

1- Le maïs et son maltage

Le maïs est une céréale appartenant à la même famille biologique que le blé, le sorgho, le mil, l'orge, le froment, le seigle, l'avoine. Il est adapté pour la transformation biochimique au brassage grâce à la présence d'enzymes qu'il fournit lors du maltage [1]. Sa qualité microbiologique est influencée par la présence des moisissures [2].

Ayant une grande adaptabilité écologique, le maïs offre un fort rendement moyen à l'hectare et occupe la deuxième place après le blé au monde [2]. En 1991 sa production était estimée à 39 millions de tonnes en Afrique [3]. Le maïs est disponible toute l'année au Congo et sa production annuelle a été estimée à 97 000 tonnes en 1997 [4].

Plusieurs variétés de maïs sont produites au Congo, mais les conditions de stockage sont peu rassurantes pour la germination des grains au cours du maltage. En effet, si certains malts de maïs commercialisés à Brazzaville présentent un taux de germination élevé, d'autres par contre proviennent des grains de maïs ayant très peu germé : d'où l'intérêt de caractériser et de doser les activités enzymatiques de différents types de malt de maïs.

Au cours du processus de maltage, les grains de céréales sont mis à germer et acquièrent un pouvoir enzymatique hydrolytique. Le produit obtenu appelé malt est désagrégé et plus léger que le grain natif ; il peut être utilisé à l'état frais (malt vert) ou séché.

Le malt est de plus en plus produit à l'échelle industrielle à partir des diverses céréales autre que l'orge et est utilisé en brasserie, distillerie, biscuiterie, boulangerie-pâtisserie

et dans la fabrication des soft-drinks [5]. D'autres utilisations du malt interviennent dans les préparations traditionnelles d'eau-de-vie à base de manioc (*boganda* au Congo Brazzaville, *ngbako* en République Centrafricaine et *lotoko* en République Démocratique du Congo) et la formulation des bouillies alimentaires tels que le *poto-poto* (bouillie de maïs) [6 ; 7], l'*Ogi* Béninois et d'autres produits à densité nutritionnelle élevée [8].

Si le processus de maltage industriel d'autres céréales est maîtrisé grâce aux apports scientifiques et technologiques dont il a bénéficié, celui du maltage traditionnel de maïs dans la production d'eau-de-vie à base de manioc reste encore très dispersé et irrégulier à cause de l'insuffisance de connaissance dans ce métier [9].

2. Le manioc et sa transformation en *foufou*

La culture du manioc (*Manihot esculenta* sp.) est répandue dans plusieurs pays tropicaux en développement : Amérique latine (Brésil, Colombie), Asie du Sud-Est (Thaïlande, Malaisie, Indonésie), Afrique sub-saharienne.

2.1- La racine de manioc

La racine du manioc est utilisée en alimentation humaine et animale ainsi qu'en industrie (fabrication de la colle, textile, papeterie).

En alimentation humaine, le manioc est consommé, après transformation physico-chimique et biochimique sous forme de produits plus ou moins élaborés dont pour l'Afrique Centrale (Congo Brazzaville, Congo Démocratique, Gabon et Centrafrique) :

- 1) *le foufou* (farine de racine de manioc rouie et séchée),
- 2) la *chikwangue* (pâte cuite et conditionnée de racine de manioc rouie et pétrie),
- 3) et le *gari* (semoule de racine de manioc obtenue après râpage, fermentation au cours d'égouttage, cuisson et séchage).

Le manioc est disponible au Congo toute l'année [3]. La racine de manioc épluchée est caractérisée par :

1. la faible teneur en protéines (2 % environ de matière sèche) qui conduit malheureusement à un moût à faible concentration en acides aminés nécessaires à la bonne tenue de la fermentation éthylique ;
2. la faible teneur en lipides (0,8 % de matière sèche) et donc en acides gras

insaturés et stérols ;

3. la présence de deux glucosides cyanogéniques, la linamarine et la lotaustraline, précurseurs de l'acide cyanhydrique HCN, en quantité variable selon les variétés douces ou amères (300 - 900 ppm de HCN, en matière sèche) ;
4. la présence en quantité limitante des acides aminés soufrés (méthionine, cystéine).

Au cours de diverses transformations de la racine de manioc, les composés cyanogéniques sont dégradés par voie enzymatique avec la linamarase ou par voie chimique à 150°C ; il en résulte l'élimination de l'acide cyanhydrique HCN très volatil.

Dans la production du *boganda*, le fufou (farine de racine de manioc rouie et séchée) est la principale biomasse glucidique employée.

2.2. - La transformation de la racine de manioc en fufou.

La transformation de la racine de manioc se fait selon les étapes suivantes : l'équeutage, l'épluchage (facultatif), le rouissage dans l'eau ou dans un sol humide [10]. Après la fermentation suivent les opérations d'épluchage (éventuellement), de nettoyage, de séchage au soleil, et finalement de broyage et de tamisage manuels ou mécaniques au moyen d'un moulin électrique. Le broyage-tamisage permet d'obtenir une farine dont le profil granulométrique n'est pas standardisé.

Les transformations physico-chimiques et biochimiques interviennent principalement au cours de la fermentation. En effet, au cours du rouissage, la racine de manioc qui se ramollit, se détoxifie grâce à l'action combinée des linamarases végétale endogène et microbienne. Le pH de la racine de manioc de 6,90 environ au début du rouissage diminue et devient acide (4,50 environ) en fin de fermentation [10]. La racine de manioc acquiert ainsi de nouvelles caractéristiques physicochimiques, biochimiques et sensorielles.

3- L'eau

L'eau joue un rôle très important dans les transformations alimentaires d'agroressources. Dans la production du *boganda*, l'eau est utilisée à plusieurs niveaux : dans le rouissage des racines de manioc pour la fabrication du fufou, dans le trempage des grains de maïs pendant le maltage, dans le nettoyage d'équipements, dans la cuisson et fluidisation de la pâte cuite du fufou, dans la préparation du moût et

finalement, lors de la distillation.

Dans les transformations physicochimique, microbienne et enzymatique des biomasses, l'eau joue le rôle de solvant, permet la dispersion des phases et de diverses substances dont certaines sont des substrats et d'autres des enzymes ou des microorganismes. Elle intervient dans l'équilibre acido-basique et participe aux réactions d'hydrolyse et d'oxydo-réduction. Elle joue un rôle essentiel dans les phénomènes de régulation thermique. Aussi, pour ses diverses utilisations en transformation alimentaire d'agro-ressources, l'eau doit avoir une propriété chimique et microbiologique spécifiée. Cependant, dans la préparation du *boganda*, la qualité microbiologique et physicochimique de l'eau n'est pas contrôlée et n'est pas non plus standardisée.

II- Problématique

Le *boganda*, un alcool de bouche consommé au Congo, se prépare dans des conditions non contrôlées, avec des équipements rudimentaires. Il présente un aspect trouble et des qualités sanitaires incertaines.

Si dans plusieurs pays, les technologies traditionnelles de production de boissons alcoolisées ont fait l'objet de travaux scientifiques qui ont contribué à des innovations ayant conduit à l'industrialisation de certains produits traditionnels comme le *tempeh* indonésien et les sauces orientales [11 ;12], le saké au Japon, le *tchapalo* en Côte-d'Ivoire et le *tiquira* au Brésil [13], il existe peu de données sur le *boganda*, produit par des méthodes traditionnelles au Congo.

Notre étude vise la connaissance des procédés de production du *boganda* et la compréhension de l'influence de certains paramètres sur la fermentation en vue de l'optimisation des conditions de fabrication.

A cet effet, notre travail a porté sur les points suivants :

- la connaissance des paramètres caractéristiques des procédés de production du *boganda* ;
- la détermination des conditions du maltage de maïs en vue de la maximisation de l'activité α -amylasique du malt ;
- la compréhension de l'influence de certains paramètres technologiques sur la fermentation éthylique.

Chapitre 1 :Aspects généraux sur les fermentations

La fermentation éthylique et la distillation sont utilisées depuis l'antiquité, mais on sait communément que ces techniques étaient connues des Pharaons. Ces procédés qui sont encore très largement utilisés de nos jours [11 ;13 ;14 ;15 ;16 ;17] comportent les étapes suivantes :

1. La production de la matière première ;
2. Le traitement préliminaire de cette matière première permettant l'obtention, d'une part d'un jus fermentescible, d'autre part de sous-produits qui seront valorisés ;
3. La fermentation permettant d'obtenir, d'une part un jus contenant l'éthanol et d'autre part du gaz carbonique et de la levure sèche ;
4. L'extraction par distillation suivie selon la qualité d'éthanol désirée de rectification et ou déshydratation, permettant d'obtenir, d'une part l'éthanol de la qualité désirée (flegmes déshydratés, carburant rectifié extra neutre), d'autre part des sous produits alcooliques et des vinasses ;
5. La valorisation des sous-produits ;
6. Le traitement/valorisation des effluents.

1- Production de la matière première

Toute matière première permettant d'obtenir une solution de sucres fermentescibles est une matière première potentielle et trois principaux types de biomasses peuvent être utilisées : les biomasses à sucres simples directement fermentescibles par la levure (fruits, betteraves, canne à sucre, sorgho sucrier, mélasses de canne et de betterave), les biomasses amylacées (céréales, pomme de terre, manioc, patates douces, topinambour) et les biomasses à cellulose.

2- Transformation de la matière première en jus fermentescible

La transformation de la matière première en moût sucré fait appel à des technologies différentes selon les matières premières mais qui sont des combinaisons de l'une ou l'autre des techniques suivantes : simple dilution (mélasses de betteraves), épuration et traitement thermiques (mélasses de canne), extraction par pressage ou diffusion (betteraves et canne). Plusieurs procédés (cuisson thermique, hydrolyse acide ou enzymatique) sont employés dans la conversion de la biomasse amylacée en moût sucré. Selon De Clerck [18] , Stewart [19]. et Cecil [1] , l'amidon pur ou autre biomasse amylacée doit d'abord être empesé par une cuisson thermique pour libérer les molécules d'amylose et d'amylopectine. Après un refroidissement à la température d'action amylasique (50°C - 65°C), l'empois est mélangé à une mouture de malt

préalablement diluée. Ensuite le mélange est malaxé pour permettre la saccharification à une température contrôlée correspondant à l'activité maximale des enzymes : un moût sucré est ainsi obtenu. Un test à l'iode dilué permet d'apprécier la fin de la saccharification [18].

Au cours de la transformation biologique de la matière première en jus fermentescible, divers mécanismes permettent d'expliquer le déroulement des activités enzymatiques sur la dégradation des macromolécules.

L'hydrolyse des polysaccharides par voie biologique présente plus d'avantages que l'hydrolyse chimique à cause de la spécificité des réactions contrôlables lesquelles conduisent à de meilleurs rendements de formation de sucres fermentescibles.

2.1- Dégradation biologique de l'amidon.

2.1.1- Amidon.

L'amidon est un homopolysaccharide de réserve chez les végétaux et les champignons. Il est sous forme de granule dont le diamètre varie entre 3 et 100 μm [20] renfermant deux biopolymères : l'amylose et l'amylopectine.

L'amylose est un polymère linéaire de 100 à 1000 résidus de D-glucose réunis par liaisons glucosidiques α -(1→4) [20 ;21].

L'amylopectine est une variété d'amylose ramifiée comportant entre 300 à 40.000 résidus de glucose [18 ;20 ;21] liés d'une part par des liaisons glucosidiques α -(1→4) dans les parties linéaires et des liaisons α -(1→6) aux points de branchement des chaînes. On compte en moyenne une ramification tous les 25 résidus de glucose et chaque chaîne latérale comprend 15 à 25 résidus de glucose.

Sous l'effet de la chaleur, les granules d'amidon éclatent et libèrent les deux molécules d'amidon dans le milieu : c'est l'empesage rendant les molécules libres et facilement hydrolysables par les enzymes. La température d'empesage est fonction de la taille des granules d'amidon et de la matière d'où ils proviennent (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Caractéristiques de l'amidon

Biomasse amylicée	Amidon			Références
	Température d'empesage (°C)	Teneur (%MS)	Ratio : amylopectine/amylose	
Malt d'orge	55-60	-	4/1	[18]
Orge	60-68	60	4/1	[18]
Maïs	65-75	63	2,7/1	[21]
		73,4		[2]
Manioc	60-80	81,5	2,7/1	[22]

MS : Matière sèche

2.1.2- Dégradation biologique de l'amidon.

La digestion de l'amidon dépend de son état physique (cru ou empesé), du pH et de la température d'action enzymatique (Tableau 1.2).

L'amidon cru est lentement attaqué par les amylases endogènes des pousses de pomme de terre et des céréales en germination ainsi que celles de la farine de blé crue [1 ;18 ;19 ;23 ;24], mais également par des amylases fongiques (*Rhizopus* et *Aspergillus niger*) colonisant les biomasses amylicées pour réaliser la fermentation dans le milieu [19]. Lorsque l'amidon est empesé, il devient plus facilement hydrolysable par les amylases d'origine végétale (pousses de pomme de terre et grains de céréales surtout germés) et celles d'origine bactérienne (*Bacillus subtilis*, *B. licheniformis*), fongique (*Rhizopus*, *Aspergillus oryzae*, *Asp. niger*), mais également levurienne (*Saccharomyces diastaticus*, *Endomycopsis fibulgera*, *Schwanniomyces*) [1 ;18 ;19 ;25 ;26].

Tableau 1.2 : Caractéristiques des enzymes dégradant l'amidon [27].

Enzymes	Origine	pH optimum d'action	Température optimum d'action	Type d'attaque	Digestion amidon cru	Produit de dégradation de l'amidon
ALPHA AMYLASE EC 3.2.1.1.	Salive humaine	6,9		endo	oui	Glucose, maltose, maltotriose et oligosides jusque 7 unités glucose
	Pancréas	6,9				
	Aspergillus oryzae	5,5	50°C			
	Aspergillus niger	3,5	55°C			
	Bacillus subtilis	6,5	65°C			
	Bacillus licheniformis	6,5	75-92°C			
Orge germée	5,8	80-105°C	75°C			
BETA AMYLASE EC 3.2.1.1.	Orge Microbienne	5,2 5,0-7,5	63°C	exo	non	Maltose
PULLULANASE EC 3.2.1.41.	Klebsiella pneumoniae	6,0	50-55°C	endo	non	Chaîne linéaire type amylose
ISOAMYLASE EC 3.2.1.68.	Pseudomonas amyloclavata	3,5	50-55°C	endo	non	Chaîne linéaire type amylose
AMYLOGLYCOSIDASE EC 3.2.1.3.	Rhizopus	4,8	55°C	exo	oui	Glucose
	Asp. Niger	4,2	60°C			

Les activités amylolytiques nécessaires à la production d'éthanol et d'alcool de bouche peuvent provenir :

- soit par utilisation de mouture de malt de céréales, la voie traditionnelle la plus répandue [1 ;18 ;26 ;28] ;
- soit par utilisation de spores de moisissures amylolytiques [1 ;24] ;
- soit par utilisation de préparations enzymatiques, la voie la plus adaptée pour la saccharification de l'amidon [18 ;19 ;21 ;24 ;26 ;27 ;29].

Les amylases sont des enzymes extracellulaires synthétisées par la cellule et excrétées dans le milieu pour réaliser la digestion de l'amidon (Figure 1.1).

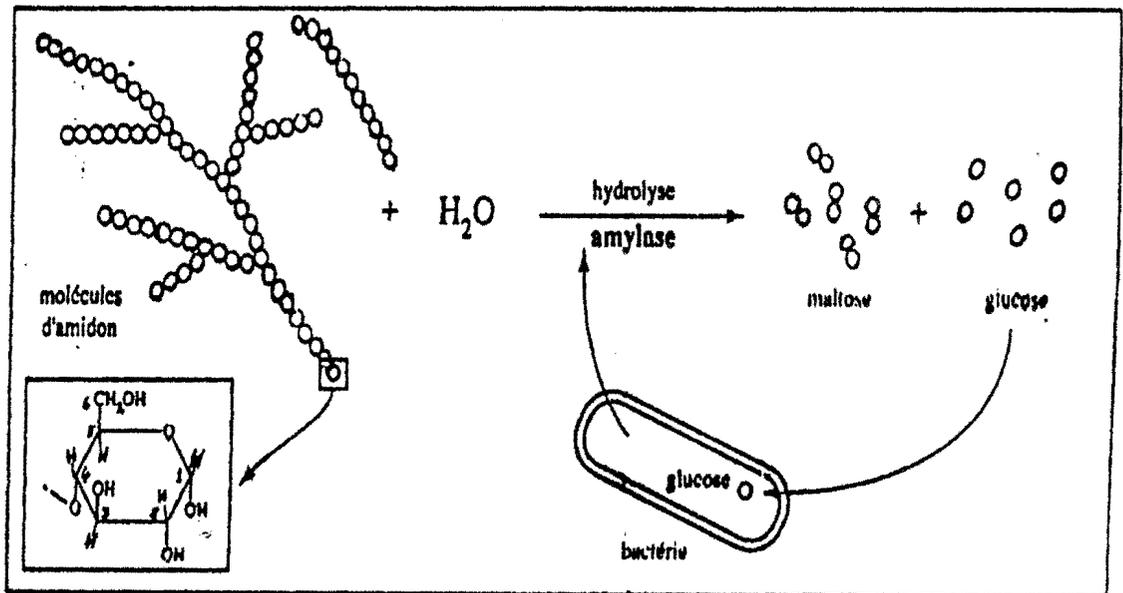


Figure 1.1 : Schémas d'hydrolyse d'amidon par une bactérie [30]

2.1.3. Action des enzymes amylolytiques.

A partir de leur spécificité d'action sur les liaisons glucosidiques α -(1→4) et α -(1→6), les enzymes amylolytiques peuvent être classées en trois groupes :

- les enzymes spécifiques des liaisons glucosidiques α -(1→4) ;
- les enzymes spécifiques des liaisons glucosidiques α -(1→6) ;
- et les enzymes spécifiques des liaisons glucosidiques α -(1→4) et α -(1→6).

Les enzymes amylolytiques spécifiques des liaisons glucosidiques α -(1→4) sont : l' α -amylase ou enzyme liquéfiante et la β -amylase ou enzyme saccharifiante. L' α -amylase est une endo-enzyme (enzyme dextrineisante) dont les sites d'attaque sont à l'intérieur des molécules d'amidon (Figure 1.2). Elle libère au hasard des dextrans de 6 à 9 unités de glucose, du maltose et du glucose (Figure 1.2). La β -amylase, une exo-enzyme, libère des molécules de maltose à partir des extrémités non réductrices et poursuit le travail de l' α -amylase (Figure 1.2). L'hydrolyse conjuguée réalisée par l' α -amylase et la β -amylase s'arrête à deux ou trois résidus de glucose des points de ramification établis par des liaisons glucosidiques α -(1→6), conduisant à des dextrans-limites comme c'est le cas dans la fabrication du pain et de la bière [18 ;19 ;21 ;24 ;29 ;31].

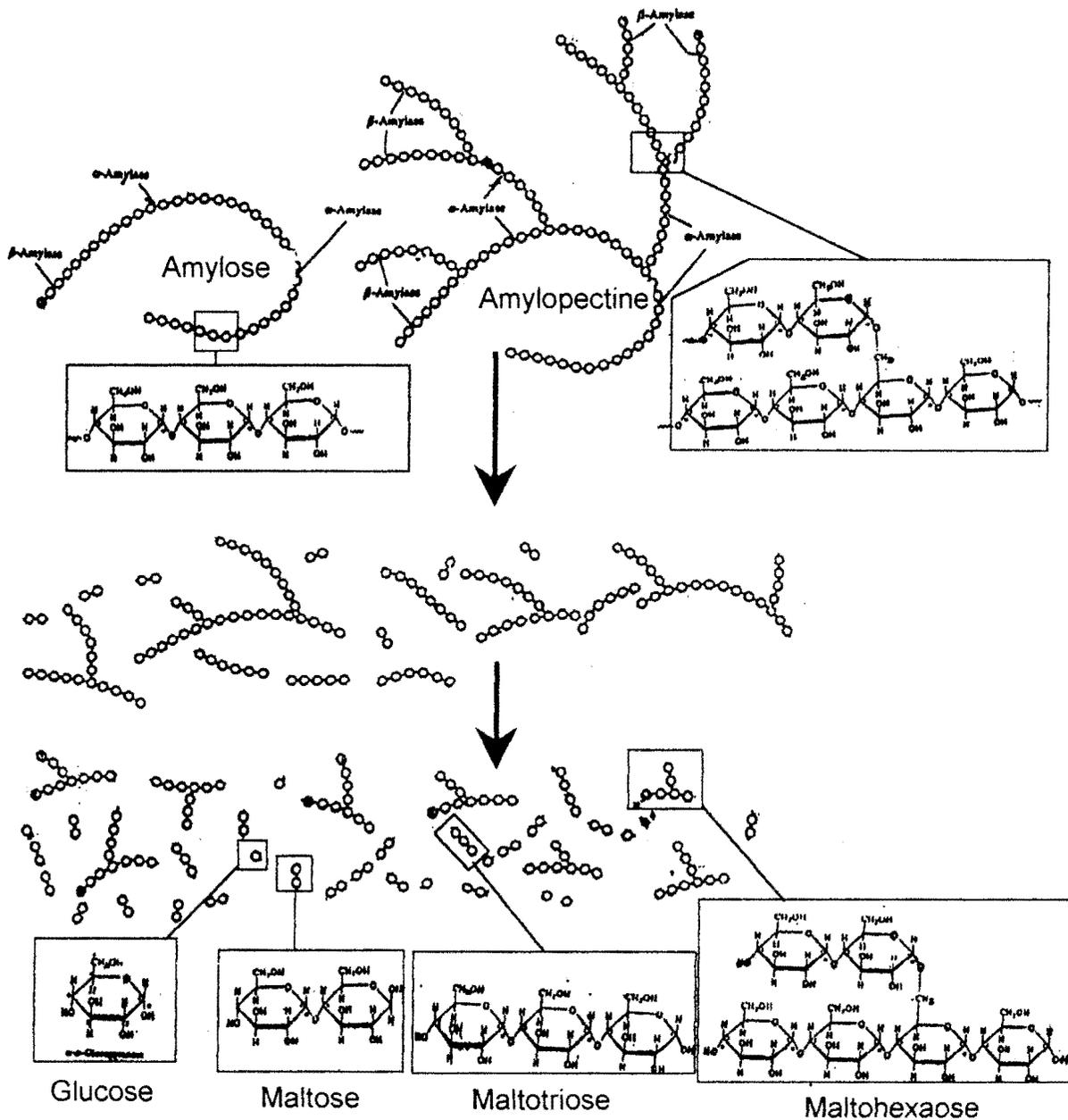


Figure 1.2 : Hydrolyse conjuguée de l'amylose et de l'amylopectine par la β -amylase et de l' α -amylase pendant la fabrication du pain [24] et de la bière [31].

Les enzymes amylolytiques spécifiques des liaisons glucosidiques α -(1 \rightarrow 6) sont des enzymes à activités débranchantes ; elles donnent à partir de l'amylopectine, des oligosaccharides linéaires de type amylose (Tableau 1.2). La pullulanase, une enzyme de ce type d'origine végétale, est actuellement préparée à partir d'une souche d'*Aérobacter aérogenes* [27]. Une autre enzyme débranchante d'origine microbienne, l'iso-amylase, est active sur l'amylopectine.

L'enzyme amylolytique spécifique à la fois des liaisons glucosidiques α -(1 \rightarrow 4) et α -(1 \rightarrow 6), la glucoamylase ou amyloglucosidase, est une enzyme d'origine microbienne (*Aspergillus niger*, *Rhizopus*) à activité débranchante. Elle libère rapidement du glucose

par hydrolyse des liaisons α -(1→4) à partir des extrémités non réductrices ensuite coupe lentement les liaisons α -(1→6) et se limite au maltose. La glucoamylase permet de lever la limite d'action de l' α -amylase et la β -amylase sur l'amylopectine [19]. Son action est peu intéressante en brasserie à cause de sa thermorésistance dans les conditions de pasteurisation de la bière [18 ; 19] ; cependant, elle est très intéressante dans la production d'éthanol et en distillerie basée sur l'amidon [1 ; 18 ; 27].

Dans la production d'éthanol et d'alcool de bouche faisant intervenir une biomasse amylicée (grains de céréales, racine de manioc et pomme de terre), on note la présence des polysaccharides non amylicés : la cellulose, les pentosanes, les β -glucanes et les fructosanes. Ces polysaccharides peuvent également subir une dégradation spécifique par des enzymes hydrolytiques endogènes et celles d'origine microbienne pour fournir des sucres fermentescibles supplémentaires [18 ; 32 ; 33 ; 34]

Par ailleurs, il existe d'autres activités enzymatiques dont le rôle est plus ou moins marqué au cours de la fermentation alcoolique; c'est le cas des phytases qui dégradent les phytates IP6 en libérant des phosphates qui confèrent au moût son pouvoir tampon.

3. Fermentation

3.1 Aspects biochimiques

La conversion des polysaccharides en sucres simples et la fermentation de ces sucres simples font appel à plusieurs types d'enzymes. Avec la biomasse amylicée, les activités amylolytiques sont traditionnellement apportées par les céréales germées et aussi par les pousses de patates [1 ; 7 ; 8 ; 18 ; 35]. En fait à côté des activités amyliciques interviennent des activités enzymatiques saccharifiantes non amylolytiques (β -glucanases) responsables de la dégradation des parois cellulaires de l'endosperme farineux, favorisant ainsi l'action des enzymes amylolytiques [18 ; 33], des activités protéolytiques [36] et phytasiques permettant la libération des phosphates nécessaires notamment au pouvoir tampon du moût [18].

Le moût sucré et peptoné obtenu à la suite des activités enzymatiques est un milieu favorable au déroulement de la fermentation qui permet la transformation des monosaccharides (glucose, fructose) et certains oligosaccharides (maltose, maltotriose, saccharose) en éthanol et métabolites secondaires.

Ces métabolites de fermentation dont le rôle est très important dans les caractéristiques organoleptiques (aldéhydes, alcools, acides organiques, esters, cétones, acétals, etc..)

sont fonction de l'espèce et de l'état physiologique de la souche microbienne mise en jeu seule ou en interaction avec d'autres microorganismes [36 ; 37 ; 38 ; 39 ; 40 ;41]. Leur production, par ailleurs, est soumise à une régulation par un certain nombre de facteurs biochimiques (sucres, acides aminés, acides organiques, stéroïdes, divers métabolites de fermentation), et physicochimiques (températures, pression, agitation, pH, pression d'oxygène) en relation avec la forme et la taille du bioréacteur [18 ;36].

3.2- Aspects microbiologiques

La fermentation est une phase importante de la fabrication au cours de laquelle l'éthanol est produit. Cette fermentation alcoolique fait intervenir des enzymes microbiennes permettant la conversion des sucres en divers métabolites dont les plus importants sont les esters, les aldéhydes, les acides organiques (acide acétique) et les alcools (méthanol, éthanol et alcools supérieurs). Les souches microbiennes mises en jeu sont généralement des levures (*Saccharomyces*), des moisissures (*Mucors*, *Rhizopus oryzae*) et des bactéries comme *Zymomonas mobilis* [18 ; 38 ; 42 ; 43] qui apparaît avoir un potentiel considérable dans les fermentations alcooliques industrielles. En effet, cet organisme qui utilise la voie de Entner-Doudoroff pour le catabolisme du glucose peut produire plus de 1,9 moles d'éthanol par mole de glucose fermenté. *Z. mobilis* peut fermenter des concentrations élevées de glucose rapidement en alcool plus que les levures. Il ne fermente que le glucose, le fructose et le saccharose et ne peut utiliser d'autres sources de carbones tels le maltose et l'amidon. Cette bactérie a une tolérance à l'alcool similaire aux levures [44].

Dans les fermentations traditionnelles, les micro-organismes sont apportés par les matières premières et réalisent une fermentation spontanée non contrôlée. Au cours de ces fermentations mixtes traditionnelles, les différentes espèces microbiennes sont en compétition, les unes dominant les autres à un moment donné de la fermentation [18 ; 38 ; 41 ;42 ;45 ;46]. De plus en plus un ensemencement des souches pures est réalisé pour permettre une fermentation contrôlée.

Divers mécanismes conduisent à la fermentation alcoolique à partir des sucres fermentescibles du moût sucré et peptonisé.

3.3-Dégradation du glucose et formation du pyruvate

Au cours de la fermentation éthylique, les microorganismes (levures) doivent avoir à leur disposition des sucres fermentescibles comme source de carbone et source d'énergie. Les sucres fermentescibles couramment présents dans un moût sucré sont : le glucose, le saccharose, le fructose, le maltose, le maltotriose [18 ; 19; 24 ; 36 ;38] (Figure 1.3)

Ces différents sucres fermentescibles sont assimilés par la cellule dans l'ordre suivant : saccharose, glucose, maltose, fructose et maltotriose (Figure 1.4). Le maltotétraose n'est pas assimilé ainsi que toutes les dextrans à plus de 4 unités de glucose.

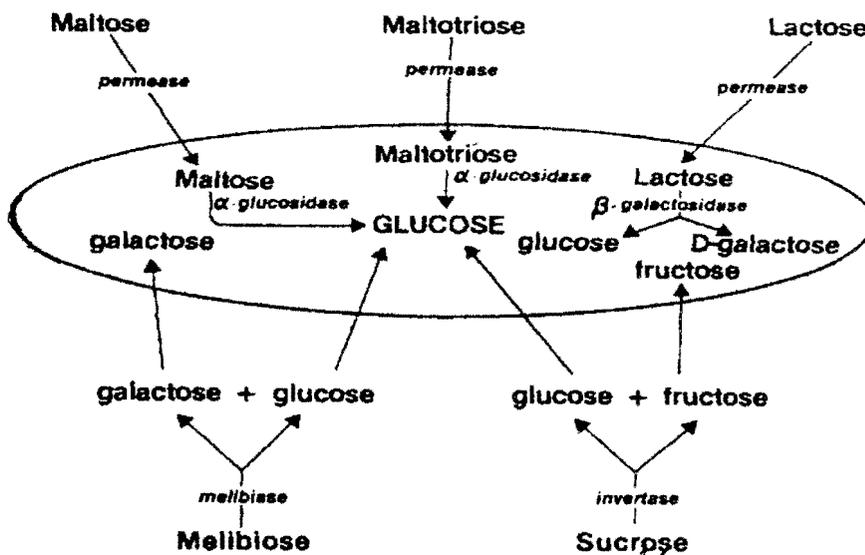


Figure 1.3 : Sugar uptake by Saccharomyces and related genera [19].

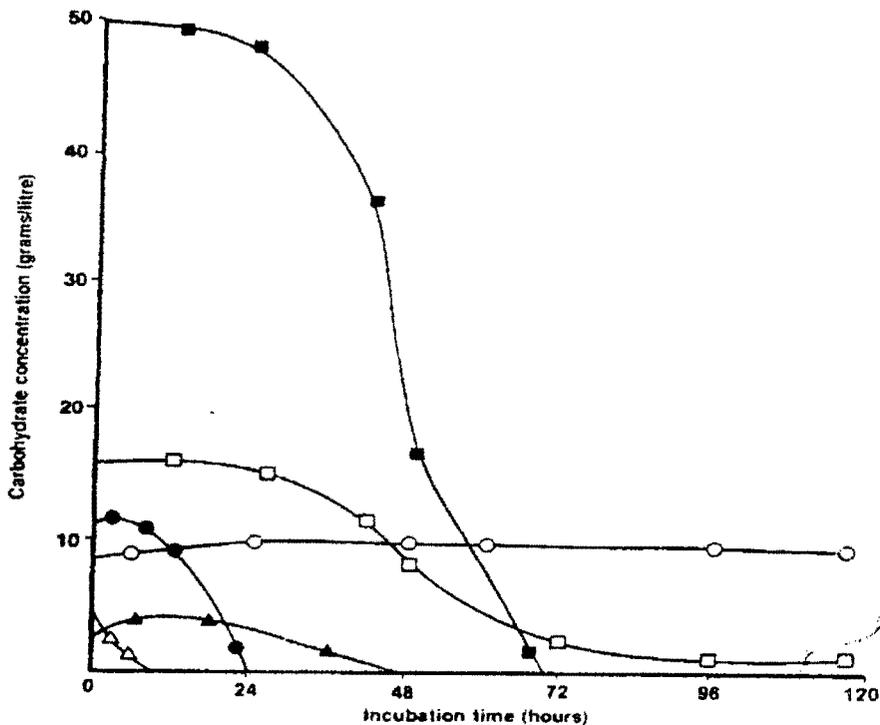


Figure 1.4 : Carbohydrate uptake during wort fermentation – maltose (■), maltotriose (□), glucose (●), maltotétraose (○), fructose (▲) and sucrose (△), [19].

Dans la cellule, le glucose une fois phosphorylé ne peut plus ressortir et subit le métabolisme cellulaire sauf dans le cas de la fermentation gluconique chez certains genres de moisissures (*Aspergillus*, *Penicillium*) et certains genres de bactéries (*Pseudomonas*, *Acétobacter*).

Les voies de dégradation du glucose sont nombreuses, et ce en relation avec les différents types de microorganismes et les conditions de fermentation. La glycolyse est la voie la plus anciennement connue et la plus largement répandue chez les microorganismes, elle conduit à la formation du pyruvate (Figure 1.5). Cette voie comporte plusieurs étapes catalysées par des enzymes. Certaines étapes sont réversibles et sont soumises à une régulation enzymatique selon un mécanisme de type "go and stop" par le rapport ATP/AMP, le GTP et le citrate chez *Saccharomyces cerevisiae*. Ce mécanisme permet à la cellule de faire l'économie du substrat (le glucose). Il existe des voies alternatives à la glycolyse chez beaucoup d'autres microorganismes : c'est le cas de *Zymomonas mobilis*, bactérie alcoogène, qui utilise la voie de Entner-Doudoroff (Figure 1.6).

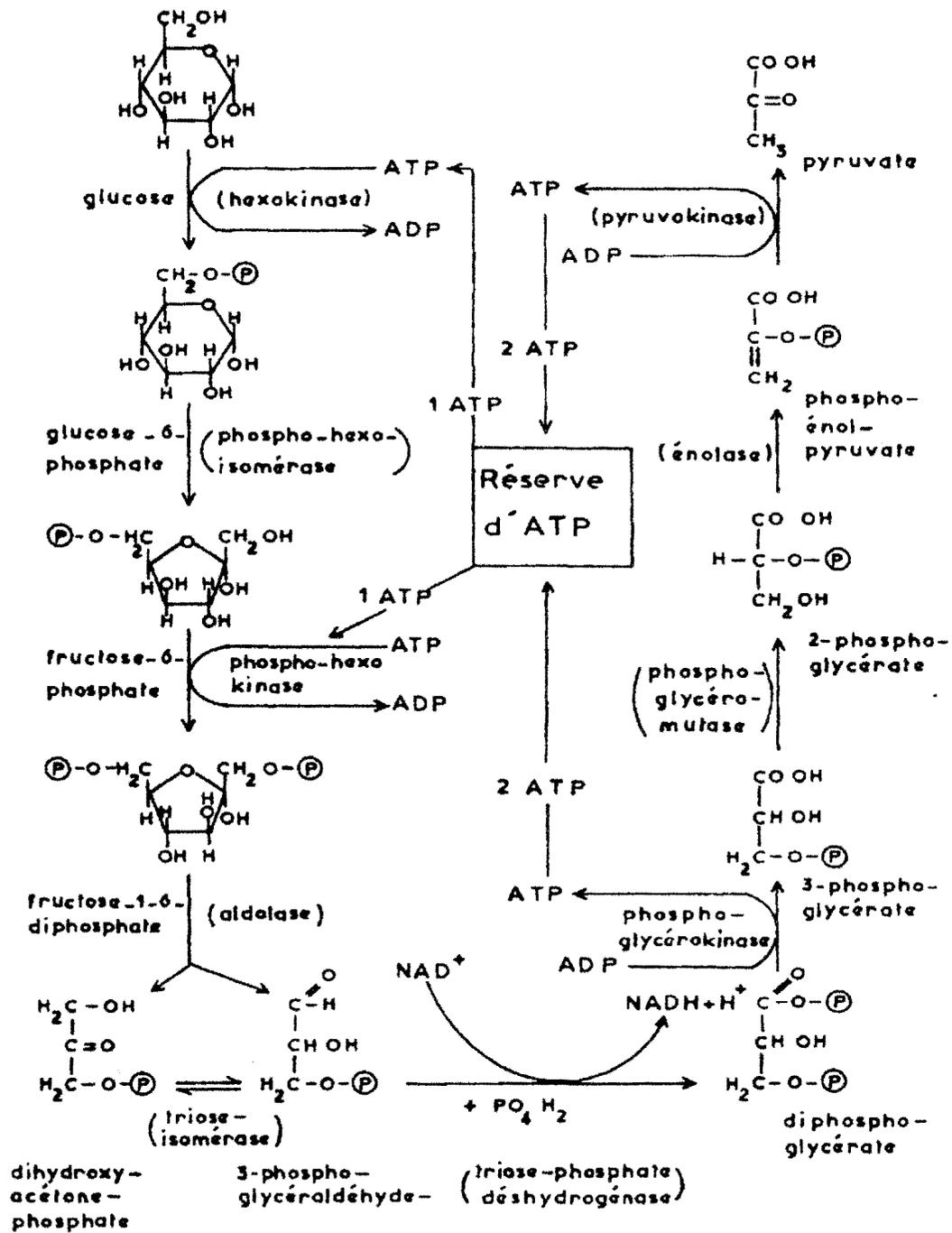


Figure 1.5 : La glycolyse (Voie d'Embden-Meyerhof-Parnas)
[43]

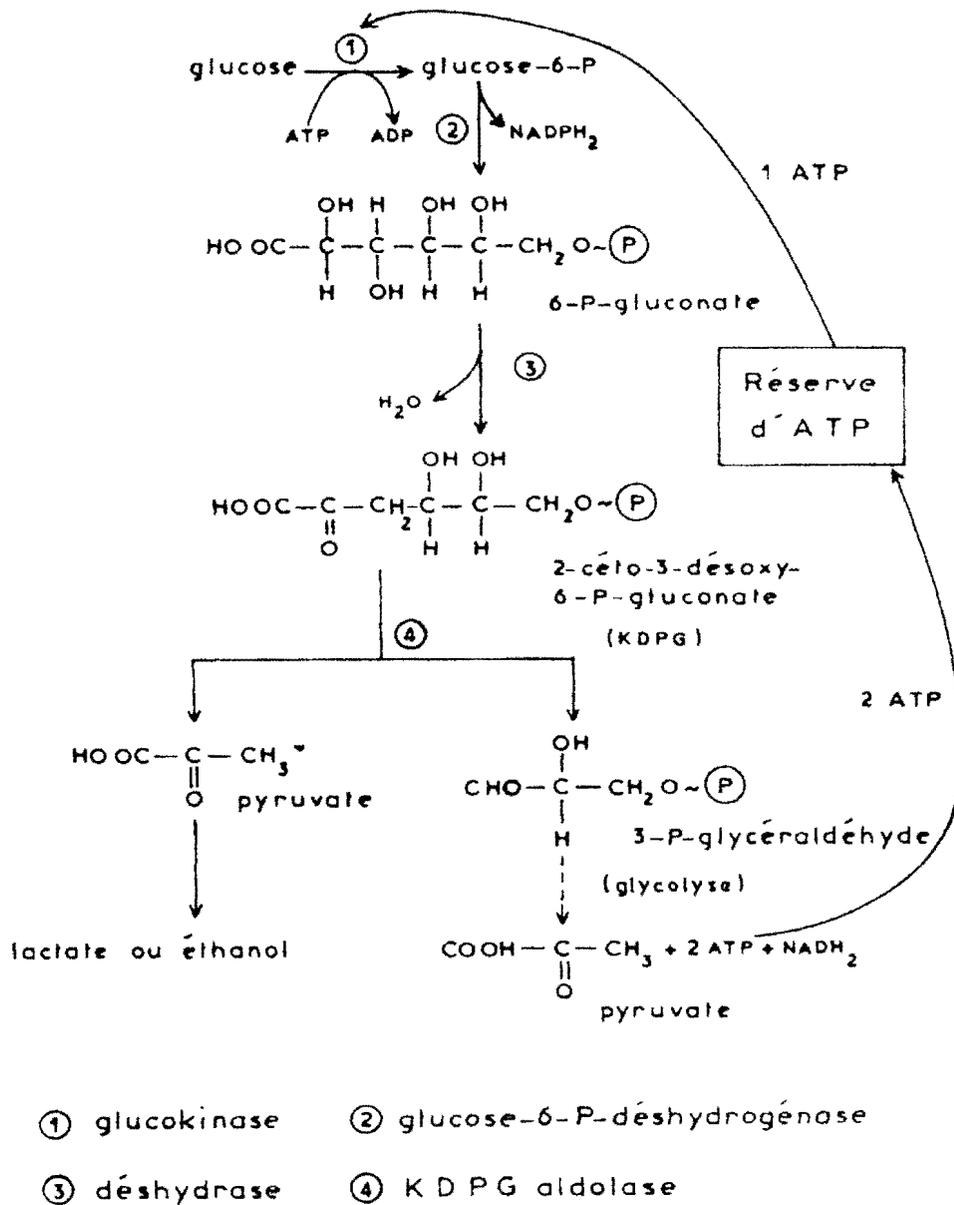


Figure 1.6 : Voie de Entner-Doudoroff [43]

Le rôle du glucose dans le métabolisme cellulaire est double ; une partie de glucose fournit de l'énergie nécessaire aux réactions de biosynthèse et de maintenance (ATP) et une dissipation sous forme de chaleur [47]. Une autre partie de glucose sert à l'édification des constituants cellulaires, toujours avec une dissipation relativement importante sous forme de métabolites excrétés (acides organiques, éthanol, gaz carbonique, esters, alcools supérieurs, acides α -aminés).

3.4- Destinées du pyruvate dans le processus de fermentation alcoolique.

Lorsque l'oxygène disparaît du milieu de fermentation, le microorganisme (levure) arrête son action de dégradation du pyruvate en produisant de l'éthanol et du gaz carbonique.

En anaérobiose, les levures (microorganismes aéro-anaérobies), les bactéries anaérobies strictes ou facultatives et certaines moisissures (*Rhizopus oryzae*) métabolisent le pyruvate selon des voies variées (Figure 1.7). Parmi ces voies on distingue : la fermentation alcoolique, la fermentation homolactique, la fermentation hétérolactique fongique, la fermentation acide mixte et butylène glycolique, la fermentation butyrique, la fermentation acétono-butylique et la fermentation propionique [43].

Dans le cadre de la production d'éthanol et d'alcool de bouche, seule la voie de la fermentation alcoolique est choisie.

La fermentation alcoolique relève du métabolisme anaérobie du pyruvate et est très répandue chez les levures et chez un nombre restreint des bactéries (*Zymomonas mobilis*) [43 ; 44]. Le pouvoir alcoogène varie d'un genre microbien (levures) à un autre (*Hanseniaspora* produit 2,4% d'éthanol et *Saccharomyces cerevisiae* en produit 11,8%) ; il peut varier entre espèces du même genre (*Saccharomyces pretoriensis* produit en moyenne 4,7% d'éthanol et *S. cerevisiae* en produit en moyenne 10,8%) [37].

La tolérance en éthanol par les levures dépend du milieu de fermentation. Les levures de genre *Saccharomyces* peuvent être classées de la manière suivante dans un ordre décroissant de leur tolérance en éthanol : *S. de brasserie* < *S. de distilleries* < *S. de vin* < *S. de saké* [43 ; 48]. La levure *Saccharomyces* du saké est plus "éthanol tolérant" car cette levure produit des vins à 20% d'éthanol (v/v) par rapport à *Saccharomyces* de brasserie produisant des bières à 8-9% d'éthanol [48].

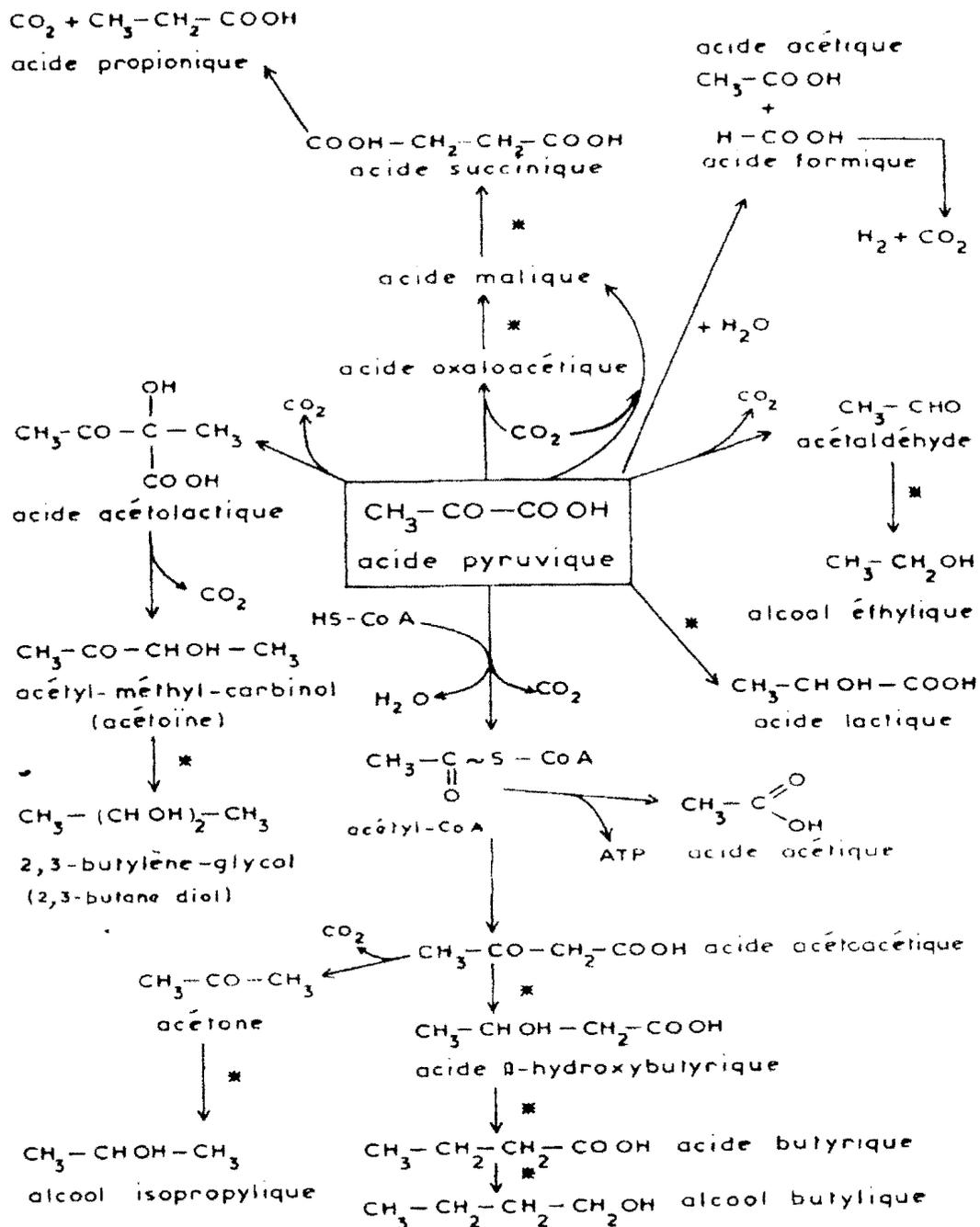


Figure 1.7 : Principales réactions terminales des fermentations utilisant l'acide pyruvique. [43]

* Réactions qui oxydent : $\text{NADH}_2 \longrightarrow \text{NAD}$

L'éthanol produit par la levure est accumulé en son sein. Casey et Ingledew [48] ont montré l'existence d'un gradient de teneur en éthanol entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule (Tableau 1.3). La composition lipidique membranaire (présence d'acides gras

insaturés et de stérols) permet au microorganisme (levure) une bonne tolérance à l'éthanol [48].

Au cours de la fermentation, l'acide pyruvique est transformé en acétaldéhyde et gaz carbonique par la carboxylase, ensuite l'acétaldéhyde est réduit en éthanol par l'alcool déshydrogénase (Figure 1.7). Tout le glucose transformé n'est qu'en partie converti en éthanol. Chez la levure en anaérobiose environ 51,1% de glucose est converti en éthanol et 2% en constituants cellulaires [43].

Tableau 1.3 : Accumulation d'éthanol intracellulaire chez la levure de genre *Saccharomyces* [48].

Yeast	Medium (w/v)	Peak Intracellular Ethanol % (w/v)	Maximum Extra-cellular Ethanol % (w/v)
<i>S. carlsbergensis</i>	12% sucrose	30	6
<i>S. carlsbergensis</i>	12% sucrose	25	6
<i>S. cerevisiae</i> UG5	10% glucose	12.7	4.5
<i>S. bayanus</i>	5% glucose	13.0	2.5
<i>S. cerevisiae</i>	26% grape must	9.4	8.3
<i>S. cerevisiae</i> UG5	10% glucose	12.5	4.5
<i>S. cerevisiae</i>	25% honey	24.0	9.4
<i>S. uvarum</i>	12% sucrose	30.0	6
<i>S. cerevisiae</i> NCYC 366	1% glucose	3.0	0.32
<i>S. cerevisiae</i> NCYC 431	20% glucose	17	9.5
<i>S. cerevisiae</i> UNSW 706800	6% glucose	0.6	0.29

3.5 - Influence des paramètres physiques, physicochimiques et biochimiques sur la fermentation éthylique.

Le système enzymatique cellulaire est complexe et soumis à une régulation par de nombreux facteurs dont : la concentration de l'enzyme et de son substrat, le pH, la température, la pression et l'agitation [18 ;36].

A chaque activité enzymatique correspond un optimum pour chacun des différents paramètres.

Dans un milieu de fermentation, l'enzyme et son substrat doivent être en concentration requise pour permettre le bon déroulement du processus.

La température a une grande influence sur la croissance et l'activité fermentaire de la cellule. Une température relativement élevée favorise la vitesse de production de la biomasse cellulaire (température optimale comprise entre 27°C et 35°C pour les levures de genre *Saccharomyces*) [18 ; 36 ; 49]. Le temps de génération est plus court à température relativement élevée [50]. La température détermine l'état biochimique de la cellule [51]. Une température relativement basse favorise la formation d'éthanol [18]. Au cours d'une fermentation industrielle, la température du milieu augmente et nécessite une régulation afin de contrôler le processus fermentaire. Cependant, les fermentations artisanales conduites à des températures ambiantes saisonnières sont sujettes des métabolismes cellulaires non contrôlés.

Pour le métabolisme cellulaire, un optimum de pH est requis en vue d'un meilleur rendement (pH compris entre 4 et 6 pour la levure de brasserie). Pendant la fermentation, le pH du milieu diminue jusqu'à une limite correspondant au terme du processus. A pH 2,8, la croissance de la levure devient difficile et il faut un pouvoir tampon assez fort pour empêcher une trop forte diminution du pH. L'abaissement du pH du milieu de fermentation reflète l'activité métabolique cellulaire [52]. Cette diminution du pH correspond à la concentration élevée de protons H^+ éjectés par la cellule dans le milieu, parallèlement à l'assimilation de certains métabolites du milieu [53].

L'agitation du milieu de fermentation permet de maintenir les cellules en suspension et d'homogénéiser la composition du milieu. Lorsqu'elle s'arrête, la sédimentation devient très intense [18 ; 36]. Un fermenteur de grande hauteur et de forme cylindro-conique est favorable à une grande agitation.

Au cours de la fermentation éthylique, le dégagement de gaz carbonique engendre la pression dans le fermenteur. Une pression élevée gêne la croissance levurienne en modifiant la vitesse de consommation des substrats et celles de production des métabolites [36].

4- Distillation

Dans l'état actuel de la technologie, l'extraction de l'alcool contenu dans le moût fermenté s'effectue exclusivement par distillation et rectification tout au moins sur le plan industriel. L'atelier de rectification, distillation est constitué d'un certain nombre de

groupes fonctionnels qui sont adaptés à la matière première travaillée et à la qualité de l'alcool désiré. Les anciens appareils étaient sans colonne ; c'est le cas du distillateur Adam en 1801 (Figure 1.8) ; pour la distillation du *boganda*, on utilise encore des systèmes simples, de taille limitée et sans colonne (Figure 3.15). Les appareils modernes sont conçus par rapport au volume du moût fermenté à distiller et au mode d'alimentation ; ils peuvent avoir des tailles très petites, de l'ordre de millilitres, ou des tailles plus grandes, de l'ordre des hectolitres, avec une colonne de Vigreux ou une à plusieurs colonnes à plateaux [54], fonctionnant en discontinu ou en continu.

La séparation des constituants d'un mélange par distillation est fondée sur la différence de composition qui existe entre les phases vapeur et liquide de ce mélange à l'équilibre. Certains mélanges présentent un point azéotropique que cette technique ne peut franchir ; c'est le cas du système eau-éthanol. Ces substances du distillat sont principalement des métabolites de la fermentation éthylique. Elles reflètent le déroulement du processus de fermentation, en relation avec la souche de microorganisme mise en œuvre seule ou en interaction avec d'autres [37 ; 38 ; 55 ; 56]. La qualité et le type de moût d'une part et le comportement de la souche microbienne d'autre part sont des facteurs déterminants pour le profil organoleptique de l'eau-de-vie obtenue, résultant de la présence des métabolites volatils issus de la fermentation parmi lesquels figurent l'éthanol (goût de brûlant), l'acide acétique (goût de piquant) et l'acétate d'éthyle (odeur de solvant) [56 ; 57 ; 58].

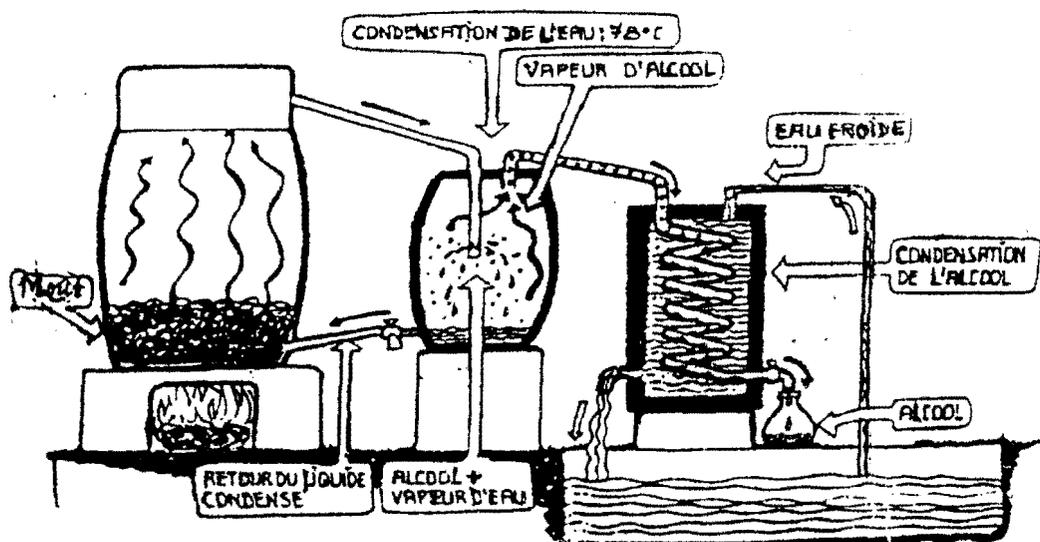


Figure 1.8- Le distillateur Adam (1801)

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

1 - Equipements de fabrication.

1.1 - Equipements du maltage traditionnel de maïs.

- Morceau de fût de 60-100 litres ou bac en plastique de 25-50 litres ;
- Sacs de jute ou sac en plastique pour la germination, le stockage et le séchage des grains ; séchoir solaire.

1.2 – Fermenteur.

Pour réaliser la fermentation au laboratoire, un fermenteur cylindrique traditionnel de 220 litres est utilisé (Figure 2.1). Il est équipé d'un dispositif pour un thermomètre à immersion (plongeant : 25 cm) et d'un robinet pour prélever les échantillons du moût. L'isolement du moût avec l'extérieur est assuré par un tissu plastique attaché au fût avec une corde.

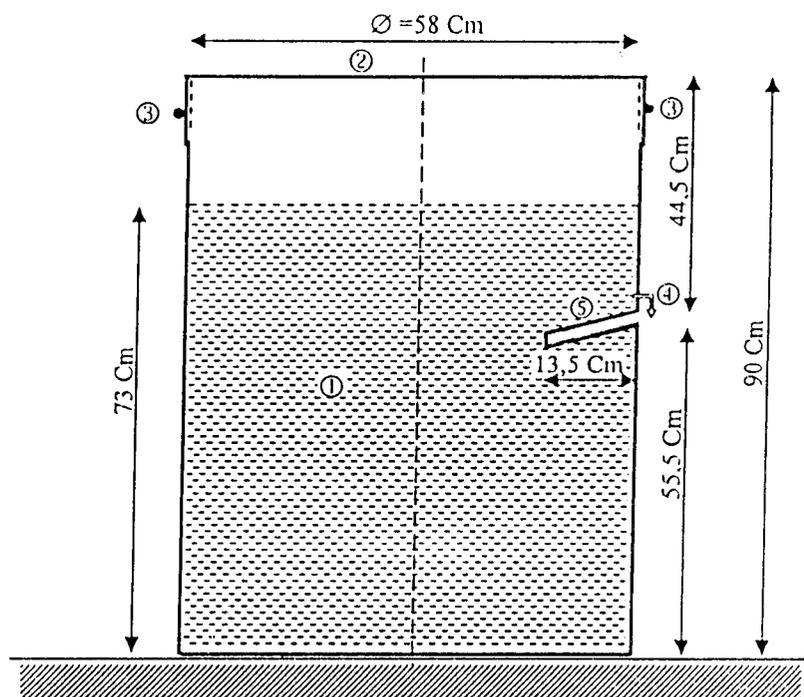


Figure 2.1 : Coupe longitudinale du fermenteur cylindrique traditionnel à fond plat
Echelle : 1/10^e

- ①- Fût cylindrique à fond plat ; $\varnothing = 58$ Cm ; H = 90 Cm ; charge moyenne 178 litres ;
- ②- Nappe plastique imperméable couvrant la partie supérieure ouverte ;
- ③- corde servant d'attache de la nappe plastique sur le fût pour assurer l'étanchéité ;
- ④- Robinet d'échantillonnage,
- ⑤- Dispositif pour thermomètre à plongeant.

1.3 - Distillateur

Pour la distillation du moût fermenté en atelier, un distillateur traditionnel dépourvu de colonne est utilisé (Figure 2.2). Il est équipé d'une chaudière dont le volume de remplissage est de 110 litres, d'un tuyau pour la condensation des vapeurs et d'un bac d'eau de condensation. Le chauffage de la chaudière se fait avec le feu de bois. Le distillat est recueilli par fractions de volume.

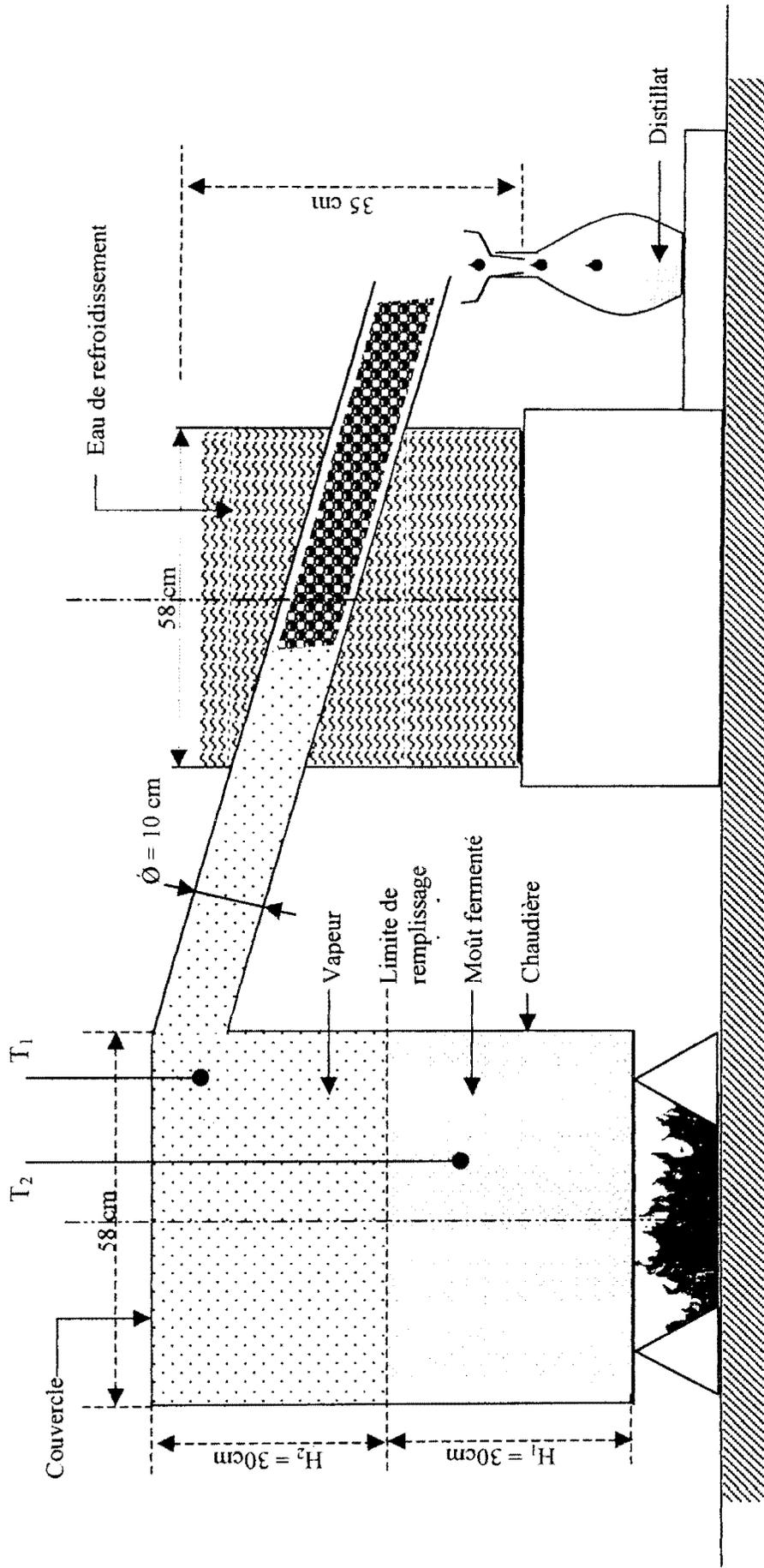


Figure 2.2 : Coupe transversale d'un distillateur traditionnel : Echelle 1/10^e

Chaudière : Charge maximale admise : 110 litres

T₁ : Thermomètre à l'entrée du condensateur

T₂ : Thermomètre plongeant dans le milieu à distiller

2 - Matériel biologique.

2.1 - Le maïs.

Plusieurs variétés locales de maïs (*Zea mays sp.*) sont utilisées pour le maltage (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Variétés de maïs utilisées

Variété de maïs	Conditions de stockage	Période de vente
Nzaka-Nzaka Sibiti Accross Mpémbé-gare Moudikoula 1	Sac en polystyrène (70-80Kg)	Toute l'année

2.2 - Le fougou

Le fougou constitue la principale biomasse amyliacée produite dans tout le pays et disponible toute l'année [3 ;4].

2.3 - La levure de boulangerie

La levure utilisée est la souche de *Saccharomyces cerevisiae* commercialisée sous le label de "Saf instant", une marque Française. Elle est utilisée sous forme sèche prête à l'emploi [59].

3. Milieux de culture

3.1. La gélose nutritive enrichie à l'amidon avec 0,5% de chloramphénicol

La gélose nutritive est enrichie avec 2 % d'amidon, 0,4 % de yeast extract, 0,5 % de chloramphénicol, 10 % d'acide tartrique [60].

3.2. Milieu PDA (Potato Dextrose Agar)

Le milieu solide PDA est acidifié avec 10 % d'acide tartrique (pH 3,5) et additionné de chloramphénicol à 0,5 % pour la sélection des levures et des moisissures.

4. Méthode d'enquête

4.1 - Population cible

La population cible est constituée de 71 personnes exerçant l'activité de production de *boganda* à Brazzaville (Congo).

4.2. Echantillonnage

L'échantillon est constitué par vingt sept (27) ateliers de production choisis au hasard dans les 7 arrondissements de Brazzaville. Pour évaluer la variabilité intra atelier, plusieurs cycles de production ont été suivis au sein d'un atelier donné.

4.3. Collecte des informations

La collecte des données a été réalisée, sur les sites de l'enquête, à partir d'un questionnaire (Annexe I) et d'interviews individuels de la population recensée. Les questions posées par les enquêteurs ont porté sur les caractéristiques suivantes :

- l'identité des producteurs ;
- les activités exercées ;
- les matières premières et les équipements ;
- la description et la durée du procédé de production du Boganda ;
- la production proprement dite ;
- les problèmes rencontrés et les vœux émis par les producteurs.

5 - Méthode de production

Ce sont les phases de production traditionnelle qui ont été reproduites au laboratoire

5.1 - Le maltage

5.1.1- Le trempage

Pour le triage et le calibrage des grains, une quantité de 9Kg à 12Kg de maïs de chaque stock a été prélevée et traitée.

Pour un essai de trempage, 10 Kg de maïs triés et calibrés sont trempés dans l'eau à 30-34°C, avec un ratio eau/maïs de 2,2/1. Parallèlement, trois lots d'échantillon de 200 g de grains de maïs sont placés dans une poche de filet en plastique afin de suivre l'évolution de la masse des grains à tout instant.

Deux modes de trempage sont utilisés : le trempage unique consistant à tremper les grains sans rinçage et sans renouvellement d'eau et le trempage séquentiel avec rinçage des grains et renouvellement d'eau trois fois par jour [61].

5.1.2- La germination

Les grains trempés et égouttés sont étalés sur un sac de jute ou en polystyrène (2 cm d'épaisseur de la couche des grains), ensuite recouverts de 3 couches de sacs en polystyrène préalablement trempés dans l'eau, afin de créer les conditions d'obscurité et éviter le dessèchement des grains. Dans le but de suivre la germination, 2 lots de 600 à 800 grains de maïs ont été mis chacun dans une poche de filet en deux endroits de la couche des grains. Pour éviter leur dessèchement la couche de maïs est arrosée d'eau deux fois par jour.

5.1.3- L'étouffement des grains germés

Les grains germés sont tassés dans un sac en polystyrène doublé afin de créer les conditions d'anaérobiose : l'épaisseur de la couche est d'environ 25 cm.

5.1.4- Le séchage du malt

Le malt vert est étalé sur un sac de jute ou en polystyrène et exposé au soleil pendant deux à trois jours. Un séchoir solaire, type incliné (aire de séchage : 5,13 m²) est utilisé. Les grains de malt vert sont étalés sur des claies suivant une épaisseur d'environ 2 cm. La ventilation naturelle de ce système peut être régulée de façon manuelle.

5.2 - La fermentation

5.2.1- Préparation des ingrédients

Un ou deux jours avant le lancement de la fermentation, une quantité de *foufou* est placée dans un fût installé pour la cuisson. De l'eau chaude ou de la vinasse chaude (résidu de distillation) à environ 85-95°C est ajoutée.

Après un malaxage vigoureux, une pâte de *foufou* plus ou moins ferme est obtenue ; elle est ensuite refroidie à température ambiante pendant une à deux nuits. Une fluidisation manuelle avec de l'eau à température ambiante a permis d'obtenir une bouillie plus ou moins visqueuse.

D'autres ingrédients secs (levure sèche) sont ajoutés à la mouture du malt de maïs avec éventuellement un pied de cuve séché préparé quelques instants avant le lancement de la fermentation.

5.2.2- La fermentation proprement dite

A la bouillie de *foufou*, est ajouté le mélange d'ingrédients secs. Après un premier malaxage du mélange dans le fermenteur (Figure 2.3), le volume est standardisé à environ 175 litres. Un deuxième malaxage permet une bonne homogénéisation du moût. Le fermenteur est recouvert des tissus souples et imperméables (nappes en plastique) solidement attachés au moyen d'une corde pour maintenir les conditions devenant progressivement anaérobies (Figure 2.1).

5.3. La distillation

A la fin de la fermentation, environ 165 litres de moût fermenté sont légèrement dilués avec de l'eau puis homogénéisés et enfin tamisés. La drèche humide est égouttée et séchée (pied de cuve séché). Le moût fermenté dépouillé est réparti dans deux chaudières équipées d'alambics rudimentaires sans colonnes ; chaque chaudière est soumise à un chauffage modéré au feu de bois.

Chaque chaudière est recouverte d'un couvercle non étanche. Dès que la vaporisation apparaît, l'étanchéité est réalisée entre les bordures de la chaudière et le couvercle, ensuite entre la chaudière et le tuyau de condensation et le bac de condensation. Cette étanchéité est assurée au moyen d'une colle traditionnelle ou mastic [62] obtenue en mélangeant de la pâte cuite de *foufou* avec une partie du résidu fin pâteux de fermentation.

Le distillat est recueilli par fractions de volume appréciées selon la sensation gustative de l'opérateur, très souvent avec le concours de ses pairs. A la fin de la distillation, la vinasse chaude (résidu de distillation) est récupérée et utilisée pour la cuisson du *foufou* d'un cycle de production suivant.

6. Méthodes d'analyses

6.1. Evaluation des paramètres physicochimiques

6.1.1. Température

Pendant le maltage, la température de l'eau de trempage et celle de la couche de grains germés (en surface, au cœur et au fond de la couche) sont mesurées à l'aide d'un thermomètre à immersion (longueur de plongeant : 25 cm). Lors de la cuisson du *foufou*, la température de l'eau chaude ou de la vinasse chaude est déterminée avant et après dilution.

Au cours de la fermentation, la température du moût est suivie toutes les 24 heures avec un thermomètre à immersion (Figure 2.1).

6.1.2- Détermination du taux d'humidité et de la matière sèche

L'humidité est déterminée selon la méthode par étuvage [61 ; 63 ; 64] de 2 à 5 g d'échantillon de maïs moulu, de malt sec, de foufou ou de pied de cuve à 103°C pendant 3 heures jusqu'à masse constante.

Le taux d'humidité est déterminé par la formule suivante :

$$H(\%) = \frac{E_f - E_s}{E_f} \times 100,$$

$H(\%)$ = taux d'humidité

E_f = masse de l'échantillon frais en gramme

E_s = masse de l'échantillon sec en gramme

Le taux de matière sèche est déterminé par la formule suivante :

$$MS(\%) = \frac{E_s}{E_f} \times 100,$$

$MS(\%)$ = taux de matière sèche ;

E_f = masse de l'échantillon frais en gramme

E_s = masse de l'échantillon sec en gramme

Toutes les mesures sont faites en triple. La différence entre les résultats de deux déterminations parallèles effectuées sur un même échantillon ne doit pas dépasser 0,2 % d'humidité ou de matière sèche.

6.1.3- Détermination de la masse de 1000 grains secs

La masse de 1.000 grains secs est déterminée selon la méthode de De Clerck [61] modifiée. Après pesage, triage et calibrage d'un échantillon de grains secs de 300 grammes pris en double, le nombre de grains conformes est compté et leur masse mesurée ainsi que celle des impuretés et déchets recueillis. Connaissant le taux d'humidité, il a été déterminé :

$$\text{le pourcentage d'impuretés et déchets} = \frac{\text{masse de déchets et impuretés}}{\text{Masse totale}} \times 100$$

$$\text{la masse de 1000 grains conformes} = \left(m - \frac{H \times m}{100} \right) \times \frac{1000}{N},$$

Avec m = masse de grains conformes mesurée par pesée (en gramme)

H = taux d'humidité du grain (en %)

N = nombre de grains conformes déterminé par comptage.

Cette méthode permet de connaître la taille des grains de maïs de diverses variétés ; elle peut également donner une idée sur la perte de masse en grains d'une variété donnée au cours du maltage.

6.1.4- Evaluation du nombre de grains de malt plongeurs

Pour apprécier le degré de désagrégation du malt, la méthode d'essai de plongeon ou épreuve à l'eau décrite par De Clerck [61] est utilisée avec modification. Les grains de malt suffisamment désagrégés surnagent lorsqu'ils sont de nouveau trempés dans l'eau.

Cent (100) grains de malt prélevés d'un lot donné sont trempés dans 125 ml d'eau distillée (essai en triple). Après agitation, chaque échantillon est laissé au repos 3 et 10 minutes. Le nombre de grains plongeurs (grains immergés) après 3 minutes pour un essai et 10 minutes pour l'autre essai est compté. La moyenne des 3 essais est prise comme pourcentage de grains plongeurs.

Un malt bien désagrégé ne compte pas plus de 30 % de grains plongeurs.

6.1.5- Détermination du taux et de la vitesse d'absorption d'eau par les grains

Le taux d'absorption d'eau consiste à mesurer la masse de 1000 grains [61] à tout instant lors du trempage de maïs. Après avoir éliminé l'eau adhérente en frottant légèrement les grains entre deux feuilles de papier buvard, la masse de chacun des 3

échantillons de 500 grains est déterminée par pesage ; la moyenne des pesées est alors calculée puis multipliée par 2. L'augmentation de la masse de 1000 grains par rapport à la masse initiale donne la quantité d'eau absorbée rapportée à 100 grammes : c'est le taux d'absorption d'eau.

La cinétique d'absorption d'eau par le grain dans des conditions de température définies au cours du trempage permet de déterminer la vitesse d'absorption dans la zone de linéarité de la courbe correspondant à $\frac{dx}{dt} = \text{constante}$ (dx : variation du taux d'absorption d'eau pendant un temps dt). Le taux et la vitesse d'absorption d'eau permettent de comparer le comportement des grains de maïs dans des conditions définies.

Cette vitesse $v = \frac{dx}{dt}$ est exprimée en % d'eau absorbée par heure.

6.1.6- Détermination du taux germination et de la vitesse de germination

A partir de trois échantillons d'environ 600-800 grains de maïs placés chacun dans une poche [61] en filet enfouie dans la masse de grains, le nombre de grains ayant piqué et germé est repéré et compté chaque jour. Le pourcentage de grains germés est déterminé par le calcul suivant [61] :

$$\% \text{ de grains germés} = \frac{\text{nombre de grains germés}}{\text{nombre total de grains}} \times 100$$

La cinétique de germination dans des conditions définies permet de déterminer la vitesse de germination dans la zone de linéarité de la courbe correspondant à

$$v = \frac{dx}{dt} = \text{constante} \quad (dx : \text{variation du taux d'absorption d'eau pendant un temps } dt ;$$

$$v = \frac{dx}{dt} \text{ est exprimée en \% de grains germés par heure}).$$

Le taux et la vitesse de germination permettent de comparer le comportement des différents grains placés dans les mêmes conditions physiques.

6.1.7- Détermination de la longueur des organes de croissance

A partir de trois échantillons d'environ 600-800 grains de maïs en germination [61], quatre lots de 10 grains germés sont prélevés; la longueur de la radicule, de la plantule

et de la radicule la plus longue est mesurée au moyen d'une règle-loupe graduée en millimètre.

La mesure de la longueur de chaque organe de croissance est la moyenne arithmétique de 40 mesures. Elle permet l'appréciation du terme du processus de germination.

6.1.8- Détermination de la densité du moût en fermentation

La densité du moût permet de suivre l'évolution de la fermentation et de pouvoir comparer différents essais opérés dans les mêmes conditions physiques.

La densité du moût est mesurée toutes les 24 heures [18 ; 38 ; 60 ; 61]. Après avoir laissé quelques millilitres s'écouler, un échantillon de 250 ml est prélevé au niveau du fermenteur (Figure 2) puis introduit dans une éprouvette en verre de 250 ml. La densité des différents échantillons du moût est déterminée à 20° C, à l'aide d'un jeu de deux densimètres dont la gamme varie de 0,900 g/ml à 1,130 g/ml.

6.1.9- Détermination du pH au cours de la production

La mesure de pH est effectuée avec un pH-mètre.

Le pH de la trempé, lors du trempage des grains, est mesuré toutes les deux heures au début, ensuite toutes les 5 heures.

Le pH du moût en fermentation est mesuré toutes les 24 heures [65].

Le pH des différents échantillons de fractions de distillat et du *boganda* (eau-de-vie) est aussi déterminé.

6.1.10- Détermination de la turbidité de *boganda*

Elle a été réalisée selon la méthode décrite dans Analytica-EBC III [64] et Heineken [66] . L'appréciation de la turbidité a été faite selon l'échelle suivante (Tableau 2.2) :

Tableau 2.2 : Appréciation de la turbidité du *boganda* [67]

Unités E.B.C	< 0,5	0,5 - 1	1 - 2	2 - 4	4 - 8	> 8
Appréciation	Brillant	Clair	Très légèrement trouble	Légèrement trouble	Trouble	Très trouble

6.2 - Evaluation des paramètres biochimiques

6.2.1- L'acidité titrable

L'acidité titrable est déterminée par titrimétrie selon les méthodes modifiées décrites par Navarre et al. [38] , Oyeyiola [46] et De Clerck [61] .

Compte tenu du pouvoir tampon susceptible d'influencer le titrage [61], il est nécessaire de connaître l'acidité titrable pour comparer les moûts de même type soumis ou non au levurage et à l'addition du pied de cuve.

Dans un erlenmeyer, contenant 5 ml d'eau de trempe ou de moût en fermentation, sont ajoutés 50 ml d'eau distillée et 3 gouttes de la solution alcoolique de phénolphtaléine à 1 % comme indicateur ; la solution est neutralisée avec n ml de NaOH 0,1N jusqu'à ce que la teinte du liquide devienne rose.

L'acidité titrable ou acidité totale est exprimée en n ml de NaOH 0,1N utilisé.

6.2.2- L'acidité volatile.

L'acidité volatile est constituée par l'ensemble des acides organiques de la série acétique. Elle est un élément indicateur du bon déroulement de la fermentation alcoolique.

L'acidité volatile est déterminée selon les méthodes modifiées décrites par Navarre et al. [38] , De Clerck [61] :

- 100 ml de moût fermenté filtré et quelques grains de pierre ponce sont mis dans un ballon de 250 ml et 250 ml d'eau distillée dans un autre ballon de 500 ml.
- Après distillation dans un courant de vapeur d'eau jusqu'à ce que l'on obtienne dans un erlenmyer 250 ml de distillat, on titre les 250 ml de distillat par une solution de NaOH 0,1N en présence de 3 gouttes de phénolphtaléine à 1 %.

La quantité d'acides volatils est égale à : $n \text{ ml NaOH } 0,1N \times 0,006 \text{ g d'acide acétique par litre.}$

6.2.3- Détermination des composés organiques

L'analyse des différents métabolites (acides organiques, alcools, esters et aldéhydes) est réalisée par chromatographie en phase gazeuse (CPG) avec un appareil Hewlett Packard 6890 équipé d'un injecteur (280 °C) et d'une colonne HP-5 (25 m x 2.25 mm, épaisseur du film 0.25 μm). La programmation de la température est 50 °C (5 mn)

pouvant monter à 300 °C à la vitesse de 5°C/mn .Le gaz vecteur utilisé est l'hélium à un débit de 1.1 ml/mn. Le volume injecté est de 1 µL de l'échantillon dilué à 10% (v/v) avec l'acétone.

Les indices de rétention de tous les composés sont déterminés selon l'approche de Van Den Dool [68]. L'identification des composés est effectuée en comparant leurs spectres de masse avec ceux présentés par Wiley [69], Adams [70] et Joulain [71] et leurs indices de rétention avec ceux donnés en littérature.

6.2.4- Dosage de l'amidon du moût

Le dosage de l'amidon est réalisé par la méthode à l'antrone (modifiée) de Haas et Fleischmann [61] ; les essais sont réalisés en triple .

100 g d'antrone sont dissous dans 100 ml de H₂SO₄ concentré (pur).

Du moût de *boganda* est prélevé et chauffé pendant 15 minutes pour une meilleure dissolution .Ce moût est dilué au 1000^{ème} pour qu'il contienne moins de 200 mg/l de sucres ; il est ensuite homogénéisé .

Pour l'analyse d'un échantillon, 4 tubes à essais numérotés (avec bouchon) sont placés dans un bain de glace et reçoivent chacun 3ml de solution d'antrone. Après un repos de 5 minutes , il reçoivent ensuite chacun :

- tube 1 (essai témoin) : 1 ml d'eau distillée ;
- tube 2 (essai expérimental) : 1 ml de moût dilué ;
- tube 3 (essai expérimental) : 0,5ml de moût dilué + 0,5ml d'eau distillée ;
- tube 4 (essai standard) : 1 ml de solution standard de glucose (100mg/l).

Après les avoir tous refermés avec le bouchon et mélangés soigneusement mais attentivement, les tubes sont chauffés dans un bain-marie bouillant pendant 15 minutes et ensuite refroidis.

La lecture de la densité optique (DO) à 590 nm est effectuée contre le témoin. La teneur

en glucose est déterminée selon la formule : $C_{gluc} (g/l) = \frac{DO_{\text{expérimental}}}{DO_{\text{standard}}} \times dilution \times 100$.

Celle de l'amidon est donnée par la formule : $C_{amid} (g/l) = C'_{gluc} (g/l) \times 0,9$,avec

$C'_{\text{gluc}} \text{ (g / l)} = C_{\text{gluc}} - C_{\text{suc}}$. La teneur en sucres réducteurs C_{suc} , avant l'hydrolyse de l'amidon, est obtenue par la méthode classique modifiée de Bertrand [61] (AnnexeVII).

La connaissance de la teneur en amidon C_{amid} (g/l) permet d'évaluer le rendement de la consommation de l'amidon et celui de sa conversion en éthanol au cours de la fermentation du moût de *boganda*.

6.2.5- Dosage de l'activité α -amylasique du malt de maïs

Afin de pouvoir apprécier le ratio α -amylase / amidon dans le moût, l'activité α -amylasique du malt de maïs utilisé est déterminée selon la méthode modifiée de titration iodique à 690 nm [60 ; 72 ; 73].

Les essais sont effectués en triple avec un témoin blanc (ne contenant pas de préparation enzymatique)(Annexe VI).

6.2.6- Evaluation de la saccharification.

Un test à l'iode dilué est réalisé sur les fractions aliquotes du milieu en fin de fermentation, selon la méthode suivante [61 ; 64 ; 65].

Une goutte de moût fermenté est déposée sur une plaque de porcelaine et y est ajoutée une goutte de solution d'iode 0,05 N immédiatement. La saccharification est considérée comme complète lorsque la coloration obtenue après mélange est jaune-claire ; elle est incomplète lorsque la coloration est bleue ou brun-foncée.

6.2.7- Détermination de la teneur en éthanol.

- Par alcoométrie [38]:

Le titre alcoométrique des différents échantillons de fractions de distillat recueillies selon des volumes précis et de *boganda* est déterminée à l'aide d'un alcoomètre Gay Lussac dont la gamme est de 0 à 100° GL. Les lectures sont effectuées à 20°C après stabilisation de l'alcoomètre dans une éprouvette en verre de 250ml.

- Par pycnométrie selon la méthode E.B.C. décrite par De Clerck [61] (Annexe IV). Cette technique nous permet de suivre l'évolution de la fermentation alcoolique du moût de *boganda*.
- Par chromatographie en phase gazeuse (CPG) [37 ; 56 ; 61]. (Cfr §6.2.3)

6.2.8. Détermination du rendement de transformation d'amidon .

Les procédés de fermentation alcoolique mettent en œuvre des transformations biologiques des substances carbonées et azotées d'agroressources. Dans le cas du procédé de fermentation de boganda, il y a intervention des activités amylolytiques et fermentaires ; les rendements de la transformation (consommation) d'amidon et de sa conversion en éthanol sont ainsi déterminés [74 ; 75].

a- Evaluation du rendement de consommation d'amidon.

Après avoir dosé la teneur en amidon du moût par iodométrie, au début et à la fin de la fermentation, la teneur en amidon consommé est déterminée par calcul. Le rendement de consommation R_t est évalué à partir de la relation suivante :

$$R_t = \frac{[A_m]_i \times 100}{[A_m]_0} \quad , \text{ avec } R_t = \text{rendement de consommation d'amidon (en \% w/w)} ;$$

$[A_m]_0$ = teneur initiale en amidon (g/l) ;

$[A_m]_t$ = teneur en amidon transformé (g/l) ;

$[A_m]_r$ = teneur en amidon résiduel (g/l) ;

$[A_m]_t = [A_m]_0 - [A_m]_r$.

b- Evaluation du rendement de conversion d'amidon en éthanol.

Connaissant la teneur en amidon consommé et celle de l'éthanol formé au cours de la fermentation, le rendement de conversion d'amidon en éthanol $Y_{Et/Am}$ a été déterminé selon la relation suivante [74 ; 75].

$$Y_{Et/Am} = \frac{dEt}{dA_m} ; \text{ après intégration } \Rightarrow Y_{Et/Am} = \frac{[Et]_f}{[A_m]_c} \quad , \text{ avec :}$$

- $Y_{Et/Am}$: rendement en éthanol formé par rapport à la quantité d'amidon consommé (g d'éthanol/g d'amidon consommé) ;
- $[Et]_f$: teneur en amidon formé (g d'éthanol / litre de moût) ;
- $[A_m]_c$: teneur en amidon consommé (g d'amidon / litre de moût).

6.2.9. Détermination de la productivité en éthanol.

La productivité d'éthanol est retenue comme critère de performance [74] pour évaluer les différents procédés de fermentation étudiés en tenant compte des contraintes économique(le temps).

La productivité maximale horaire en éthanol P_{TE} a été déterminée selon la relation suivante [74] :

$$P_{TE} = \frac{[Et]_f}{t_M} , \text{ avec}$$

- . P_{TE} : productivité maximale horaire en éthanol (en g d'éthanol / litre.h) ;
- . $[Et]_f$: teneur en éthanol à la fin de la fermentation au temps t_M (en g/litre);
- t_M : durée totale d'un cycle de fermentation (en heure).

6.3. Analyse microbiologique

La présence, sur les grains de malt, des moisissures filamenteuses a été recherchée.

Dénombrement des microorganismes après culture sur milieu solide :

A partir du malt du maïs 10 grammes de grains sont broyés à l'homogénéisateur Waring Blendor. Le broyat est mis en suspension dans 90 ml d'eau peptonée stérile. Pour le moût, au temps t_0 et toutes les 24 heures durant la fermentation, 10ml d'échantillon sont prélevés. Des dilutions décimales jusqu'à 10^{-4} sont préparées à partir de la suspension et des échantillons du moût. Différents milieux de culture solides ci-après sontensemencés en surface en vue de l'isolement et la numération de divers microorganismes :

- Gélose nutritive pour la flore fongique et bactérienne ;
- Milieu de culture P.D.A (Potato Dextrose Agar) : pour la sélection et le dénombrement des levures et moisissures ;
- Gélose nutritive enrichie à l'amidon à 2% avec chloramphénicol à 0,5% : pour la sélection et le dénombrement des levures et moisissures amylolytiques.

Les milieux sontensemencés avec 0,1ml de différentes dilutions à raison de trois boîtes de Pétri pour chaque dilution ; la culture a lieu à 30 - 37°C pendant 3 à 5 jours à l'étuve.

Le dénombrement réalisé après culture correspond à la moyenne des nombres de colonies développés (entre 10 et 100 colonies par boîte). Les résultats sont exprimés en unités formant colonie par millilitre. (UFC/ml)

6.4 Analyse Statistique :

Pour l'analyse des paramètres du procédé de production de *boganda*, la méthode modifiée basée sur la loi de Gauss-Laplace a été utilisée, comme l'ont présentée Nicolas et al. [30] et Larrieu [76], en vue d'apprécier la répétitivité des analyses et des opérations. Ainsi les paramètres statistiques suivants ont été considérés :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} ; \text{ avec : } \bar{x} = \text{valeur moyenne arithmétique des échantillons};$$

$$x_i = \text{valeur unitaire de l'échantillon } i;$$

$$n = \text{nombre d'échantillons.}$$

$$1 \leq i \leq n \text{ et } n \geq 1;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} ; \text{ avec : } \sigma = \text{écart - type};$$

$$CV_{(\%) } = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 ; \text{ avec : } CV = \text{coefficient de variation en pourcentage}(\%)$$

$$IC = \bar{x} \pm \sigma ; \text{ avec : } IC = \text{intervalle de confiance.}$$

7- Test de dégustation du *boganda*

Réalisés à 25°C, les tests sensoriels ont porté sur les caractéristiques suivantes de *boganda* : la clarté, l'odeur, l'arôme, le brûlant, le piquant et l'astringence. Tous les tests effectués sont des tests de différence entre échantillons de *boganda* (tests triangulaires : 2 verres contenant un même produit et un verre contenant un produit différent). Ainsi, 16 échantillons sont soumis à la dégustation.

Chaque caractéristique est alors évaluée par les dégustateurs de la manière suivante : clarté : 20 ; odeur : 20 ; arôme : 20 ; brûlant : 20 ; piquant : 10 et astringence : 10 pour une évaluation globale de 100. Des fiches de dégustation sont présentées aux dégustateurs (Annexe III).

Le jury de dégustation est composé de 42 personnes dont :

- 35 habituellement consommatrices de *boganda* (25 Congolais de Brazzaville, 5 Centrafricains, et 5 Congolais du Congo Démocratique),

- et 7 découvrant le produit (1 Vietnamien, 6 Congolais de Brazzaville)

A partir d'un formulaire pour la dégustation du *boganda*, les produits ont été caractérisés et appréciés selon leur niveau d'acceptabilité sensorielle (Annexe II) [65] .

Chapitre 3 : Résultats

I-Etude des paramètres caractéristiques de la méthode traditionnelle de production du *boganda*.

Divers paramètres permettant de caractériser la méthode traditionnelle de production de *boganda* ont été déterminés à partir d'une enquête menée au niveau de 27 ateliers exerçant l'activité de production du *boganda*.

A. Paramètres socio-économiques.

La production de *boganda* est d'environ 76.190 litres /an en moyenne pour 71 sociétés. Elle présente un intérêt économique véritable (Tableau 3-1) avec un revenu global annuel de cinquante six million neuf cent trente un mille sept cent vingt sept (56.931.727) Francs CFA. Le bénéfice brut dégagé par production correspond à 25,75%.

Tableau 3-1 : Production annuelle et bénéfice brut dégagé par 71 sociétés enquêtées.

Paramètres statistiques	Paramètres considérés			
	Production globale de <i>boganda</i> à 23°GL (l/an)	Revenu global (F CFA/ an)	Bénéfice brut	
			F CFA	(%)
Valeur moyenne	76.190	56.931.727	14.659.919,7	25,75
Ecart-type	6.430	4.822.500	1.241.793,75	
Coefficient de variation (%)	8,44	8,47	8,47	

Au niveau des ateliers étudiés, la production de *boganda* est une activité exercée en majorité par les femmes (66 femmes contre 5 hommes) soit 91,55%. L'apprentissage du métier de production de *boganda* se transmet le plus souvent de mère en fille ou auprès d'une personne expérimentée. Aucun niveau d'instruction n'est exigé pour la production et la commercialisation du *boganda*. Pour la plupart de producteurs, la production du *boganda* constitue la principale activité ; cependant, elle est une activité complémentaire pour les autres qui sont des salariés ou des petits commerçants en vue d'augmenter le revenu familial.

B- Paramètres technologiques.

1. Matières premières.

Les différents ingrédients qui entrent dans la préparation du *boganda* sont le fofou (farine de racines de manioc rouies), le maïs, la levure lyophilisée de boulangerie (*Saccharomyces cerevisiae*), le sucre, un pied de cuve séché au soleil et l'eau.

Les opérateurs accordent beaucoup d'attention à la qualité, à l'origine géographique et à la durée de stockage des matières premières. Certains (45%) préfèrent même le maïs d'une ancienne récolte (Tableau 3-2), d'autres, 41,54 %, souhaitent utiliser les variétés de maïs (Accross, Moudikoula 1) provenant du département de la Likouala et 49,23 % les variétés des maïs jaune (Accross) et de maïs vitreux (Moudikoula 1).

Tableau 3.2 : Choix de variété de maïs dans la préparation du Boganda.

Paramètres	Récolte				Origine géographique				Variété			
	Anc	Nouv	Indif	N. déc	Lik	P nord	Niari	N. déc	Jaune	Vitreux	J. vitr.	N. déc
Tendances (%)	44,61	3,1	9,23	43	41,54	24,61	15,38	18,45	27,7	7,7	49,23	15,135

Anc : Ancienne récolte ;

Nouv : Nouvelle récolte ;

Indif : Indifférente ;

N. déc : Non déclaré ;

Lik : département de la Likouala ;

P nord : département du Pool (Pool Nord) ;

Niari : Vallée du Niari ;

Jaune : maïs jaune ;

Vitreux : maïs vitreux ;

J. vitr : maïs jaune et maïs vitreux

Le *fofou* utilisé provient des rebuts, sous produit de moulins, dans 63 % des cas (Tableau 3-3), pour des raisons technologiques mais surtout économiques étant donné l'insuffisance des fonds propres.

Tableau 3.3 : Type de fofou mis en œuvre dans la préparation du *boganda*

Paramètres	Type de fofou			
	Fofou normal	Fofou ancien	Rebuts des moulins	Indifférent
Tendance (%)	5,9	15,55	63	15,55

L'eau utilisée provient en partie des puits (35,4%) et principalement du réseau de distribution de la Société Nationale de Distribution d'Eau (S.N.D.E.).

2 - Procédés technologiques.

2.1 - Qualité du maïs.

Les grains de maïs utilisés ont été triés, calibrés et dépoussiérés ; l'appréciation de la qualité du maïs dépendrait de la variété, l'origine géographique, des conditions et de la durée de stockage.

Quatre variétés de maïs ont été sélectionnées pour ce travail (variété Mpémbé-gare, Moudikoula 1, Sibiti et Accross) à partir des paramètres suivants: taux d'humidité, aspect visuel et masse de 1000 grains.

Le taux d'humidité moyen est de 12,37% et ne semble pas varier de façon significative (Tableau 3.4) pour les 4 variétés sélectionnées pour cette étude : deux variétés de maïs vitreux (Moudikoula 1 et Mpémbé-gare) et deux variétés de maïs jaune (Sibiti et Accross). Les valeurs du taux d'humidité obtenues semblent être raisonnables et devraient permettre une bonne conservation des grains de maïs.

Tableau 3.4 : Appréciation de la qualité du maïs des différentes variétés couramment utilisées en milieu réel (Masse d'un échantillon traité : 12500g)

Paramètres	Variétés de maïs et durée de stockage				M	Σ	CV (%)
	Moudikoula 1 8 mois	Sibiti 4 mois	Mpémbé-gare 3 mois	Accross 3 mois			
Humidité des grains sains (%)	12,00	12,08	12,60	12,80	12,37	0,59	4,77
Matière sèche des grains sains (%)	88,00	87,92	87,40	87,20	87,63	0,39	0,44
Impuretés et grains abîmés (%)	48,30	28,82	4,13	7,93	22,29	17,71	79,47
Masse de 1000 grains conformes (g)	325	345	301	272	310,75	27,26	8,77
Quantité exacte de grains sains dans un stock de 80 Kg (Kg)	41,36	56,95	76,69	73,65	62,16	14,17	22,79

M = moyenne ; Σ = Ecart-type ; CV = coefficient de variation en %.

L'examen visuel permet de constater que, pour le stock d'une variété donnée de maïs, la forme, la taille, la couleur des grains et la quantité d'impuretés sont variables. Ainsi, dans le cadre de cette étude, il a été important de procéder préalablement au triage et au calibrage des grains de maïs. Les résultats obtenus indiquent (Tableau 3.4) des

quantités d'impuretés et de grains abîmés variables (7,93 à 48,3 %) avec une variabilité de 79,5%.

Les mesures de la masse de 1000 grains montrent une différence assez significative de la taille de maïs (CV= 8,77 %) des différents stock traités. La variété Sibiti en contient les plus gros (1000 grains pour une masse de 345g). De plus, nous avons noté une variation très significative (22, 79%) de la masse exacte des grains conformes contenus dans les différents stocks commerciaux de maïs de 80kg (de 41,36kg à 76,69kg), (Tableau 3.4).

La présence des charançons ravageurs notée principalement dans les stocks des variétés Moudikoula 1 et Sibiti est le résultat de mauvaises conditions de conservations du maïs au sein des différents dépôts de stockage.

Toutefois, d'après les résultats d'enquête, ces différentes qualités de maïs sont préférées par certains producteurs de *boganda* car pour ceux-ci la variété du maïs importe plus que les résultats de sa transformation au maltage, à savoir : le ramollissement des grains et la formation d'une couche microbienne sur le malt. Ainsi, le taux de germination n'apparaît pas être l'élément fondamental recherché pour l'appréciation de la qualité du maïs comme c'est le cas dans le maltage industriel.

2.2 - Etapes du procédé.

Les résultats des enquêtes révèlent que le procédé de production du *boganda* comprend trois grandes opérations : le maltage, la fermentation et la distillation (Figures 3.1, 3.2 et 3.3).

a) - Maltage de maïs

Dans la production de *boganda*, le maltage dure en moyenne 15,5 jours alors qu'il faut 5 à 7 jours pour le maltage traditionnel d'orge utilisé dans la production de la bière. Comme pour l'orge, le maltage du maïs se déroule en trois étapes : le trempage, la germination et le séchage (Figure 3.1).

a.1) Le trempage du maïs

Le trempage a pour but de préparer les grains à la germination pour permettre la diffusion des enzymes et des substances de croissance. Il dure 24 à 48 heures selon la qualité du maïs et les pratiques empiriques. Au cours du trempage, les grains de maïs sont trempés dans l'eau pendant 1 à 3 jours (Tableau 3.6) à température ambiante (28 à 31°C).

a.2) La germination du maïs

Après trempage, les grains humidifiés du maïs sont étalés sur un sac en polystyrène puis recouvert de deux couches de sac en polystyrène en vue de la germination dont le but est de développer un pouvoir enzymatique maximum.

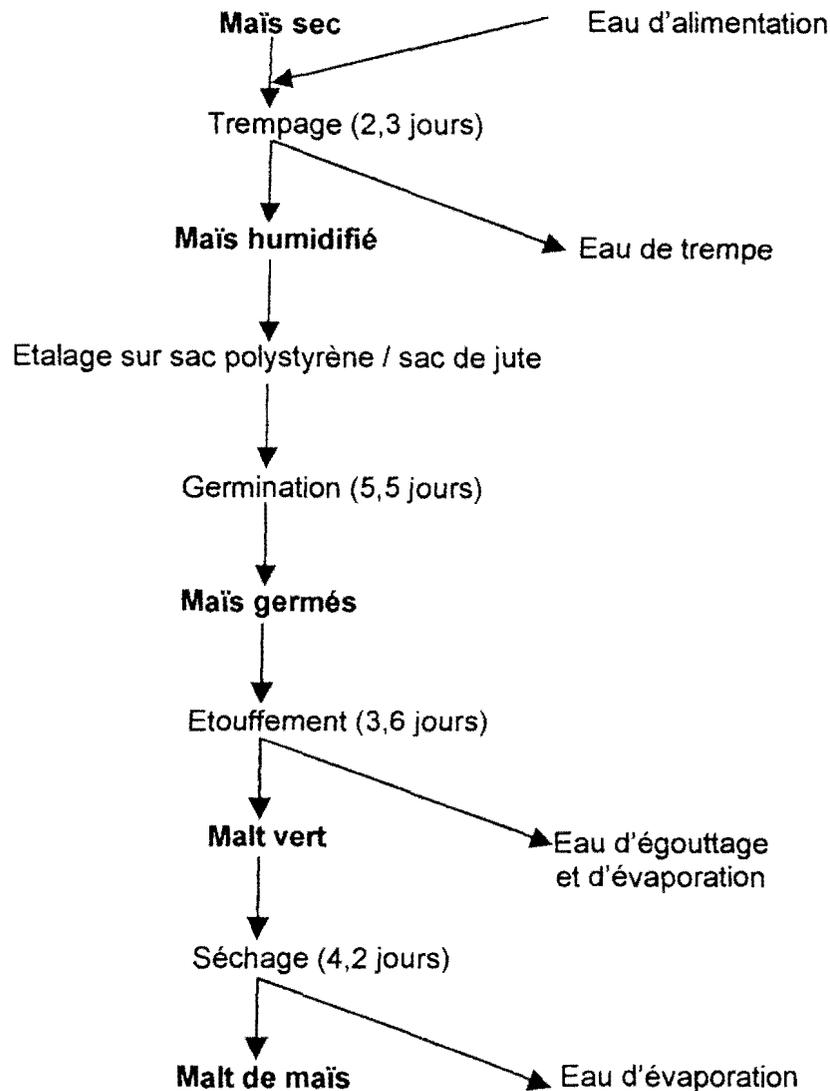


Figure 3.1 : Diagramme de maltage traditionnel de maïs
(durée moyenne d'un cycle : 15,5 jours)

La germination survient après 3 à 8 jours. Les grains germés sont ensuite enfermés dans des sacs de jute pendant 3 à 7 jours pour arrêter la germination par asphyxie et favoriser l'enrichissement en activités enzymatiques des grains : c'est l'étouffement qui conduit à l'obtention du malt vert prêt à l'emploi.

a.3)- Le séchage

Ce malt frais peut être séché pendant 2 à 7 jours à la température ambiante (28 à 36°C) s'il doit être conservé ; son taux d'humidité est en moyenne 8,33% ± 0,3% (Tableau 3.6).

Tableau 3.6 : Caractéristiques du procédé de production du *Boganda*

Etape opératoire	Paramètres	Valeurs statistiques				
		M	Σ	CV (%)	Min	Max
Maltage	Masse de maïs utilisé (Kg)	9,98	1,94	19,41	7,6	16
	Durée de trempage (jours)	2,29	0,64	27,86	1	3
	Durée de germination (jours)	5,50	1,70	30,98	3	8
	Durée d'étouffement (jours)	3,56	1,52	42,70	3	7
	Durée de séchage (jours)	4,18	2,45	58,63	1	7
	Humidité du malt (%)	8,33	0,3	3,69	7,4	8,7
Fermentation	Foufou (farine de racine de manioc rouie et séchée) (Kg)	22,1	9,22	41,74	12,8	55,2
	Eau de fluidisation de la pâte cuite de Foufou (litres)	76,20	28,84	37,84	45	110
	Durée de refroidissement de la pâte (jours)	2,23	0,70	1,17	1	3
	Masse de malt de maïs (Kg)	12,50	5,21	41,83	7,2	17,6
	Masse de levure sèche (g)	197,8	193,48	97,82	48	500
	Masse de sucre de canne (Kg)	4,00	3,78	94,56	1	8
	Masse de pied de cuve séché (Kg)	2,40	1,46	60,83	0,8	4
	Volume de fermentation (litres)	177,81	10,30	5,80	150	200
	Durée de fermentation (jours)	4,35	1,10	25,42	3,5	6
Distillation	Volume du distillat (eau-de-vie) (litres)	22,40	11,81	52,72	6	35
	Volume du distillat par fût (litres)	21,57	11,21	51,99	5	35
	Titre alcoométrique de distillat (eau-de-vie) (°GL)	23,00	3,00	15,00	18	35
	pH du distillat (eau-de-vie)	3,74	0,09	2,40	3,3	4,10
	Turbidité (°EBC)	2,50	1,3	52	1,13	5,6

M = moyenne arithmétique ; Σ = écart-type ; CV = coefficient de variation en %
 .EBC = European Brewery Convention (Convention Européenne de Brasserie)

b) - Fermentation de la bouillie de *foufou*

L'étape de la fermentation débute avec la préparation de la bouillie de foufou par cuisson à l'eau chaude ou par mélange à de la vinasse chaude (résidu chaud de la

distillation) à l'aide d'une pelle en bois. Après refroidissement (une ou deux nuits) à température ambiante, la pâte cuite de fofou est fluidisée manuellement avec de l'eau pour obtenir l'empois de fofou très visqueux : c'est la bouillie de la pâte cuite de fofou. De la mouture grossière du malt vert ou séché additionnée de pied de cuve séché et, dans certains cas, de la levure de boulangerie et du sucre de canne sont ajoutés à la bouillie de fofou (Figure 3.2).

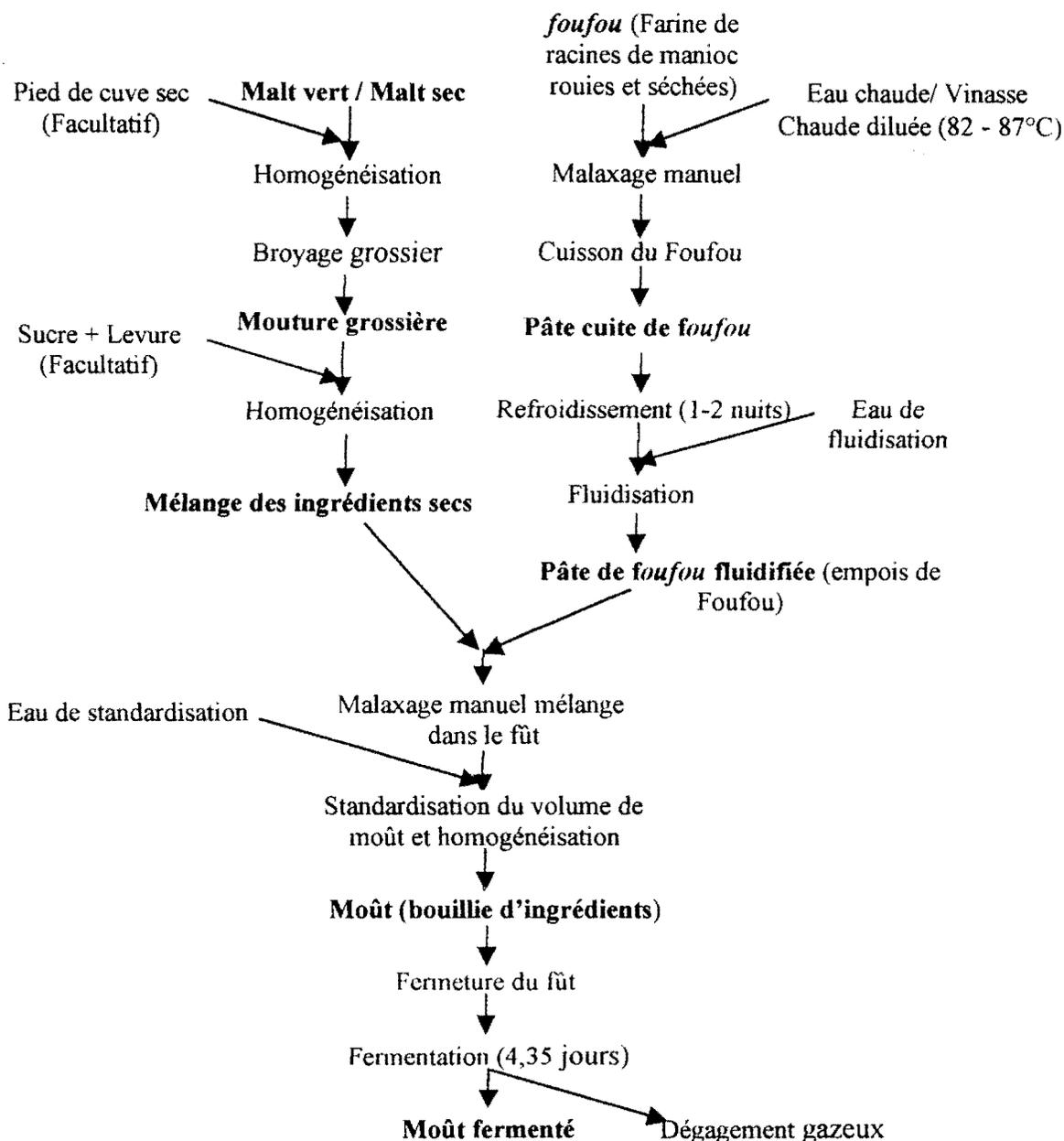


Figure 3.2 : Diagramme de fermentation traditionnelle (durée moyenne d'un cycle : 6,58 jours)

Le mélange des ingrédients obtenu est homogénéisé à l'aide d'une pelle en bois. Le volume est standardisé par addition d'eau : le moût amylicé est mis à fermenter dans

un fût de 220 litres recouvert de nappes plastiques imperméables assurant l'isolement du moût de l'air environnant (Figure 2.1).

La fermentation est spontanée et incontrôlée car elle est réalisée à partir de la flore endogène présente sur tous les ustensiles et le malt. Elle dure 3 à 6 jours (Tableau 3.6) et la température de fermentation est comprise entre 29°C et 31,5°C.

c) - Distillation du moût fermenté

La distillation artisanale traditionnelle dans la production de *boganda* est réalisée en fin de fermentation à partir du moût fermenté légèrement dilué et filtré (Figure 3.3).

On remarquera à ce stade l'absence de la colonne de distillation traditionnelle ou « colonne de Vigreux », la chaudière contenant le moût à distiller étant directement raccordé au réfrigérant (Figure 2.2). Cette conception va influencer les paramètres mesurés tels les paliers de température (Figure 3.4) et les caractéristiques des fractions récoltées (Tableau 3.15).

La température du moût à distiller et celle de la vapeur à l'entrée du condensateur (Figure 2.2) évoluent de façon parallèle avec une différence de 1°C (Figure 3-4); la vapeur chauffant moins que le moût. Les fractions de distillat obtenu ont des titres alcoométriques décroissants (38°GL à 8°GL) (Figure 3.4).

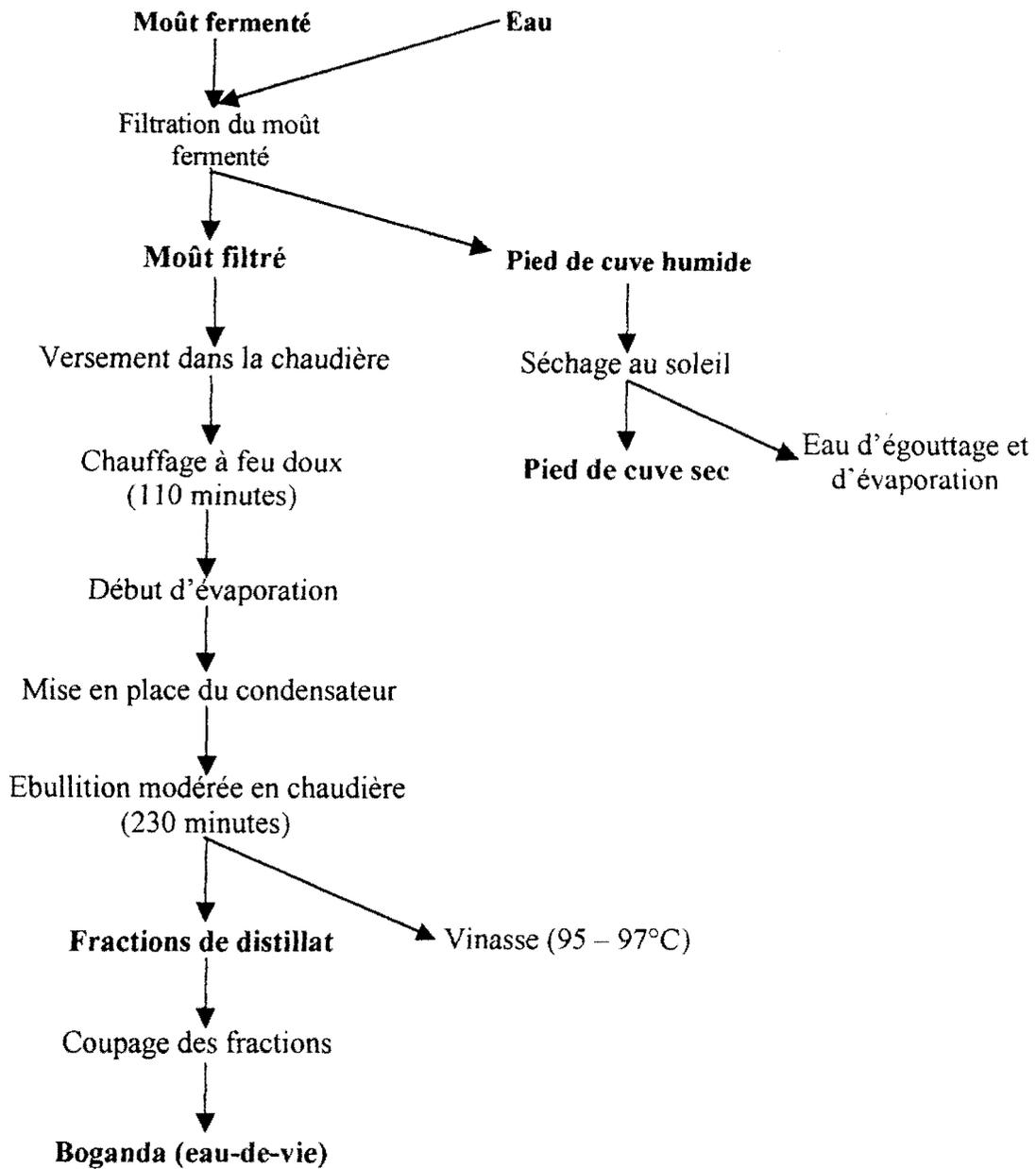


Figure 3.3 : Diagramme de distillation traditionnelle (durée moyenne d'un cycle : 9 heures)

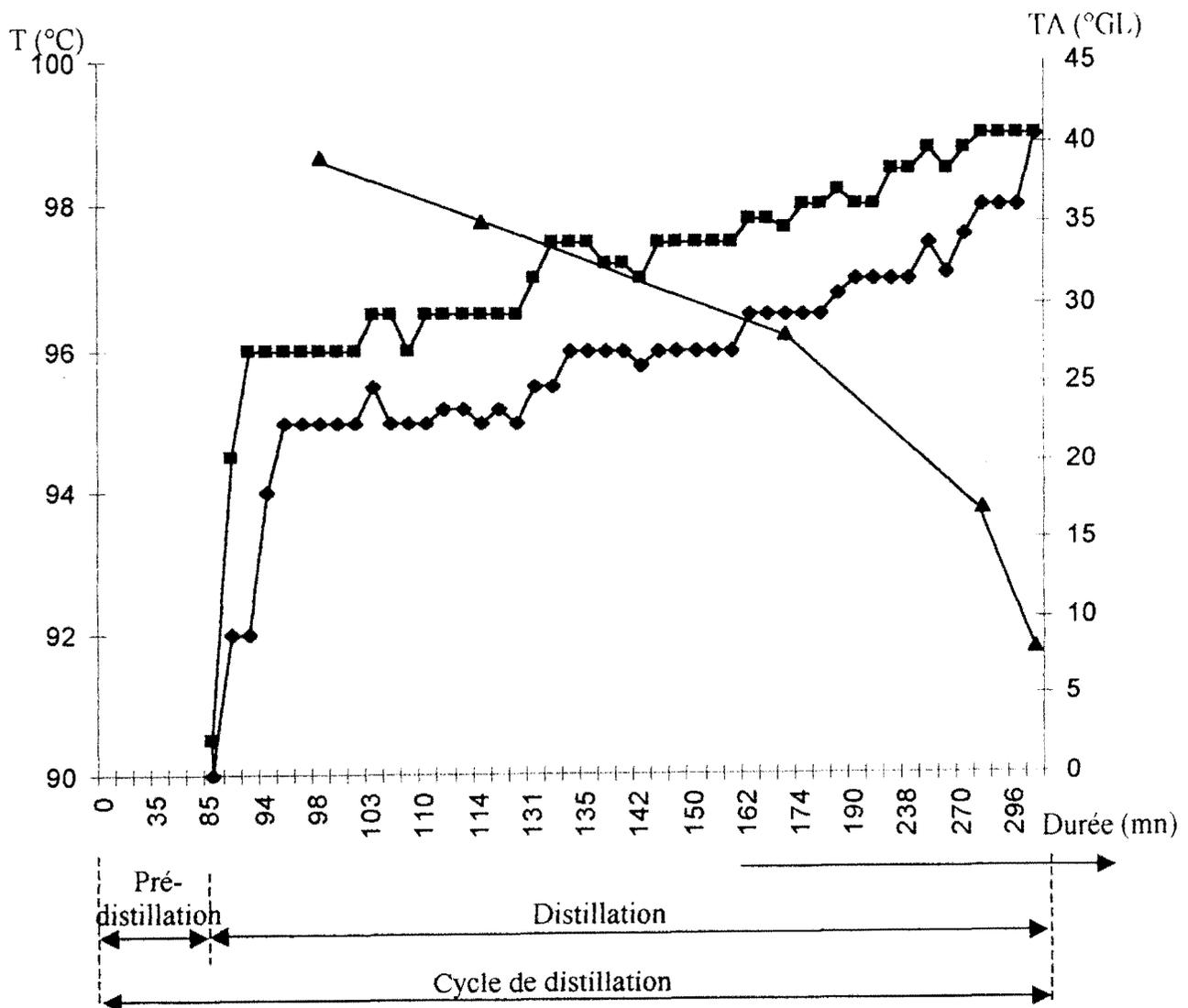


Figure 3.4 : Evolution de la température de distillation

- (◆) T₁ : température de la vapeur (°C) ;
- (■) T₂ : température du moût (°C) ;
- (▲) TA : titre alcoométrique (°GL).

L'examen des paliers de température des différents cycles de distillation montre que (Tableau 3.15) chaque palier de température correspond à une fraction de volume de distillat caractérisé par un titre alcoométrique typique. Ainsi, 4 paliers de température compris entre $94,35^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ et $97,5^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ont été observés. Le premier de ces paliers dont la durée est de 18,86 minutes est observé à $94,35^{\circ}\text{C}$ et correspond à un volume de distillat de 0,98 litre titrant 35°GL avec une acidité de 2,2ml de NaOH 0,1N (Tableau 3.15).

Le coupage des fractions de volume de distillat se fait empiriquement et conduit à une eau-de-vie : le *boganda*. Très souvent, ce sont les trois premières fractions qui sont.

utilisées pour le coupage. Dans certains cas, la quatrième fraction peut entrer dans le coupage si elle titre au moins 15°GL.

Le *boganda* obtenu est trouble (turbidité moyenne = 2,51° EBC), acide (pH moyen = 3,68) et de titre alcoométrique moyen de 22,56°GL (Tableau 3.16).

3. Variabilité entre différents ateliers de production

La technologie traditionnelle de production du *boganda* montre entre les ateliers de production une grande variabilité dans les différentes étapes du procédé de production (maltage, fermentation et distillation) (Tableau 3.6).

Les additions de levure, de sucre de canne et du pied de cuve au moût sont pratiquées de façon irrégulière (CV = 97,8%).

Les quantités du produit obtenues varient de façon significative d'un atelier à un autre (CV = 52 à 53%).

3.1- Qualités physicochimiques du *boganda*

Du point de vue des caractéristiques physico-chimiques, la durée de la fermentation est généralement de 4 jours et varie peu (CV = 25,42%). La durée du refroidissement de la pâte cuite de *foufou* est standardisée (CV = 1,17%) ; elle a lieu après deux nuits de repos de la pâte cuite à température ambiante (Tableau 3.6).

Le *boganda* est une eau-de-vie acide et trouble avec respectivement un pH de 3,71 et une turbidité de 2,48 °EBC. Le titre alcoométrique du *boganda* est de 24,2 °GL en moyenne et l'acidité volatile de 0,98 ml de NaOH 0,1N.

Certains paramètres physicochimiques de cette eau-de-vie sont très variables d'un atelier à un autre pour l'acidité titrable (CV=42,1 %) et pour la turbidité (54,8 %). D'autres paramètres sont plus stables (CV=2,2 % pour le pH et 12 % pour le titre alcoométrique) (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 : Variabilité des qualités physicochimiques du boganda produit dans différents ateliers

Paramètres Physico-chimiques	Ateliers de production de boganda																M	Σ	CV (%)
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆			
Acidité titrable (ml de Na OH 0,1 N)	0,55	1,0	0,9	1,6	1,1	1,1	0,55	0,35	0,95	0,35	0,55	0,45	2,3	1,3	1,1	1,6	0,98	0,41	42,1
pH	3,70	3,67	3,68	3,61	3,72	3,68	3,82	3,78	3,70	3,81	3,72	3,71	3,58	3,71	3,71	3,78	3,71	0,082	2,2
Titre alcoométrique (°GL)	26	21	23	30	26	26	20	24	36	23	22	27	18	22	20	23	24,2	2,9	12
Turbidité (°EBC)	1,08	2,63	1,65	2,94	1,7	4,30	5,84	2,50	2,45	1,03	1,02	2,51	4,36	1,03	2,94	1,7	2,48	1,36	54,8

A : Atelier ; M : Moyenne arithmétique ; Σ : Ecart-type ; CV : Coefficient de variation en pourcentage (%)

3.2. Composition biochimique du boganda

La composition du boganda en substances organiques volatiles (Tableau 3.8) est principalement dominé par l'éthanol (95,162%), ensuite l'acide acétique (3,348%). D'autres composés qui participent aux caractéristiques sensorielles sont présents en concentrations mineures (0,114% en moyenne pour l'alcool isoamylique et 0,025% pour le phényléthanol). Il est important de retenir que le boganda est une eau-de-vie qui est sans danger du fait de l'absence du méthanol qui est un poison.

Tableau 3.8 : Variabilité de la composition en substances organiques volatiles du boganda produit au niveau des différents ateliers.

Substances volatiles	Ateliers de production de boganda							Valeurs statistiques		
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	M	Σ	CV (%)
Ethanol (%)	98,452	97,563	91,556	96,092	86,032	97,804	98,637	95,162	4,357	4,58
Alcool isoamylique (%)	0,058	0,069	0,159	0,038	0,298	0,060	-	0,114	0,084	73,93
Acide propanoïque (%)	0,079	0,017	0,387	0,276	0,469	0,117	0,099	0,206	0,159	77,42
2-Méthylbutanol (%)	0,306	0,199	0,046	0,055	0,053	0,106	0,09	0,123	0,091	74,12
Pentanol (%)	0,074	0,008	0,680	0,592	0,865	0,008	0,122	0,336	0,501	149,3
Acide butyrique (%)	0,311	0,815	0,072	0,095	0,085	0,278	0,003	0,237	0,258	100,46
4- Méthylpentanol (%)	-	0,010	0,035	0,132	0,059	0,027	0,022	0,047	0,038	86,46
Acide hexanoïque (%)	0,201	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hexanol (%)	0,024	0,077	0,067	0,064	0,063	0,023	0,028	0,049	0,022	44,89
Décanoate d'éthyle (%)	-	0,011	0,010	0,015	0,023	-	-	0,015	0,005	33,33
Hexadécanoate d'éthyle	-	-	-	-	-	-	0,010	-	-	-

A : Atelier ; M : Moyenne arithmétique ; Σ : Ecart-type ; CV : Coefficient de variation en pourcentage (%)

A l'exception de la teneur en éthanol obtenu de façon assez régulière (CV = 4,58%), la présence des autres métabolites est très irrégulière (CV compris entre 33,33% à 149,3%) (Tableau 3.8)

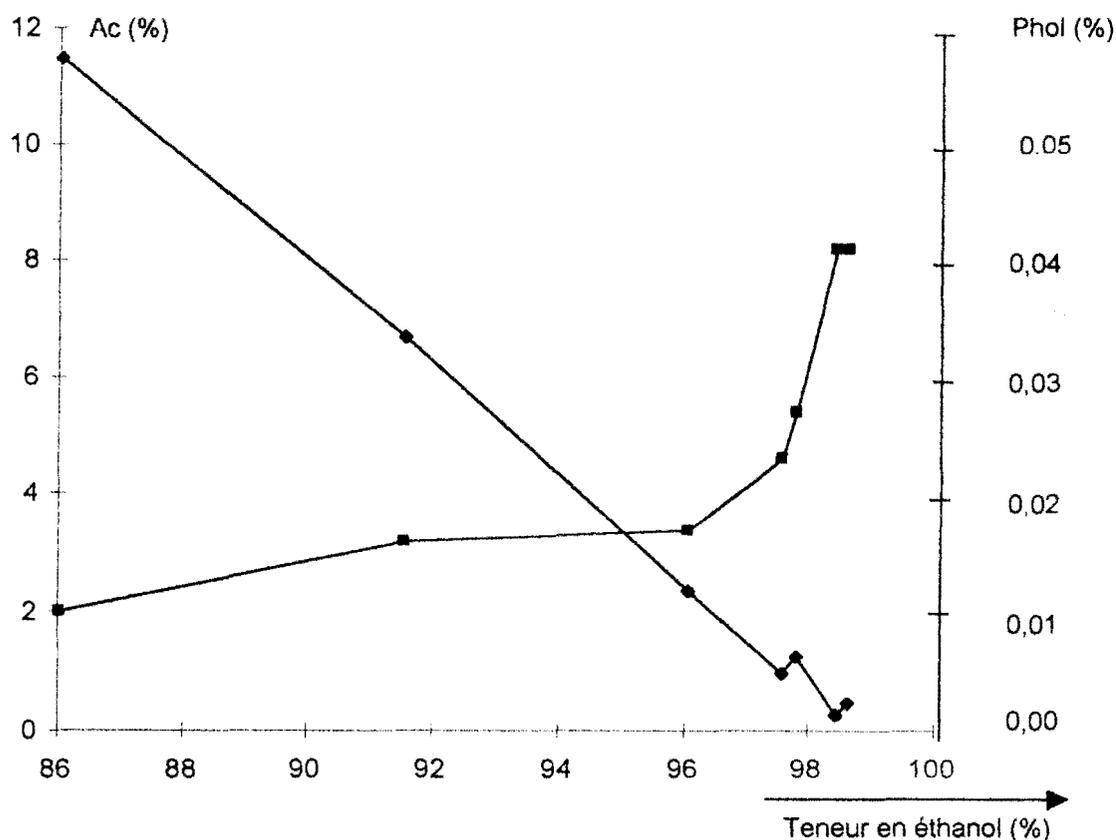


Figure 3.5 : Relation entre teneur en éthanol du *boganda* produit au niveau des différents ateliers et teneur en métabolites secondaires (◆) Ac : acide acétique ; (■) Phol : phényléthanol

Lorsque la teneur en éthanol est élevée, celle de l'acide acétique diminue, par contre celle du phényléthanol augmente (Figure 3.5). Il y a bien interconversion entre l'éthanol et l'acide acétique, tandis que la formation de phényléthanol augmente avec la teneur en éthanol.

3.3- Qualités sensorielles

L'acceptabilité sensorielle des produits est satisfaisante (cotation sensorielle globale = 60,6/100) mais elle varie de façon peu significative pour toutes les qualités sensorielles des produits testés, les valeurs de CV varient entre 8,3% et 13,44% (Tableau 3.9).

Tableau 3.9 : Variabilité des qualités sensorielles du *boganda* produit au niveau des différents ateliers

Qualités évaluées	Evaluation maximale	Ateliers de production de <i>boganda</i>																		
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆	M	Σ	CV (%)
1. Clarté	20	14,2	13,3	14,3	13,9	14,5	10,3	8,3	12,8	13,4	14,8	14,4	12,9	10,4	14,2	13,8	14,1	13,1	1,79	13,69
2. Odeur	20	13,8	11,7	12,6	13,2	13	11,3	9,8	14	11,9	12,7	13,4	11,6	10,2	13,2	9,8	12,5	12,2	1,36	11,19
3. Arôme	20	13,4	12,6	12,8	12,3	13	11,4	9,3	12,8	13,7	12,1	11,5	12,4	8,2	11,8	9,2	12,6	11,8	1,48	12,53
4. Brûlant (alcool)	20	12,8	11,8	12,2	12,9	11	11,4	8,7	10,8	12,5	12,5	12,2	11,3	9,2	12,7	11,5	12,4	11,6	1,16	9,98
5. Piquant (acide)	10	6,2	6	5,7	6,5	5,3	6	4,5	5,2	5,7	6,2	5,2	6,2	5,5	5,2	15,4	5,7	5,7	0,52	9,1
6. Astringent	10	6,2	5,4	6,5	7,1	5,8	6,4	4,9	5,2	6,2	7	6,5	6,6	4,5	5,8	4,8	6,2	5,9	0,76	13,44
7. Evaluation globale par sommation	100	67	61	64,7	65,4	64	58,5	45	60	64,5	64,2	62,4	63,5	48	62,9	54,5	64	60,6	5	8,3
8. Evaluation par appréciation globale	100	65,6	61,65	63,3	62	62,5	63	44,5	60,5	64	63,9	57	62,5	48	59,5	51,6	62,7	58,9	6,18	10,5

A : atelier ; M : moyenne arithmétique ; Σ : Ecart-type ;

CV : Coefficient de variation en pourcentage (%)

4 - Variabilité des opérations au sein d'un atelier.

4.1 -Qualité de matières premières.

La qualité de matières premières mises en œuvre est très variable (CV > 20%), à l'exception du taux d'humidité du maïs (12,37%) et du malt séché (8,34%). La quantité d'impuretés et de grains abîmés est très variables (CV = 82,06%) et le stock de maïs en contient en moyenne 22,3%. La taille de grains de maïs mis en œuvre est assez uniforme (CV = 20,97%) ; la masse de 1.000 grains est de 267g en moyenne (Tableau 3.10).

Tableau 3.10 : Caractéristiques de la méthode traditionnelle du maltage de maïs

Étapes du maltage	Paramètres	Valeurs statistiques				
		M	Σ	CV (%)	Min	Max
Trempage	Humidité du maïs (%)	12,37	0,59	4,77	11,6	14
	Impuretés et grains abîmés (%)	22,30	18,30	82,06	3,0	49
	Masse de 1.000 grains (gMs)	267,00	56,00	20,97	210	360
	Durée du stockage post-récolte du maïs (mois)	3,63	3,38	93,28	0,1	8
	Durée du trempage des grains (h)	46,50	4,03	8,67	42	52
	Taux d'absorption d'eau (%)	47,84	10,48	21,90	29	56
Germination	Durée de germination (h)	120,00	57,65	48,04	62	180
	Taux de germination (%)	53,80	42,80	79,55	8	96,6
Etouffement des grains germés	Durée d'étouffement (h)	118,00	30,83	26,13	80	164
	Température maximale en surface (°C)	49,00	3,00	6,12	48	55
	Température maximale au coeur (°C)	48,50	2,22	4,57	46	51
	Température maximale au fond (°C)	43,00	1,73	4,02	40	45
Séchage du malt vert	Durée de séchage au soleil (jours)	4,00	2,50	62,50	1	7
	Humidité finale du malt (%)	8,34	0,51	6,11	7,80	9,0
	Nombre de grains de malt plongeurs (%)	21,60	6,00	27,78	15	35
	Activité α -amylasique du malt (U/gMS)	158,60	54,60	34,42	103	220
	Concentration cellulaire des levures du malt sec (10^6 UFC/gMS)	311,20	194,00	62,34	116	510

M = Moyenne arithmétique de 16 cycles de maltage ; Σ = écart-type CV = Coefficient de variation en % ; U/gMS = Unité d'enzyme par gramme de matière sèche ;

UFC/gMS = Unité formant colonie par gramme de matière sèche

Le nombre de grains de malt visualisant le degré de désagrégation du malt de maïs est peu régulier (CV = 27,78%) avec une moyenne de 21,60 % de grains plongeurs. La concentration cellulaire moyenne de levures du malt est de $311,20 \times 10^6$ UFC/gMS, elle varie de manière très significative (CV = 62,34%) ; par contre l'activité α -amylasique varie peu (CV = 34,42%) et sa valeur est de 158,60 U/gMS en moyenne (Tableau 3.10).

4.2- Quantité de matières premières

Les quantités de matières premières utilisées varient de manière importante (CV > 10%), à l'exception de la quantité de levure mise (CV = 3,75%). La quantité moyenne du fougou utilisée est de 101,95 g/l pour 37,2 g de malt vert, 12,9 g de pied de cuve séché et 0,39 g de levure. Le volume moyen d'un brassin après standardisation avec de l'eau est de 178,25 litres (Tableau 3.13).

4.3- Le trempage.

Le trempage dure en moyenne 46,5 heures ; cette durée quasi standardisée (CV= 8, 67%) conduit à un taux d'absorption d'eau du grain de maïs d'environ 47,84% (CV = 21, 9%) (Tableau 3.10).

4.4 - La germination.

Ayant pour objet de produire et de libérer dans le grain les enzymes indispensables aux transformations pendant la fermentation, la germination a une durée relativement variable (CV= 48%). Le taux de germination dépend essentiellement de l'état des grains ; il est donc très variable (CV = 79,55%), avec un maximum de 96,6% de grains germés et un minimum de 8% (Tableau 3.10). Le taux de germination est plus élevé avec les grains fraîchement récoltés qu'avec les grains anciens.

4.5- L'étouffement.

La durée moyenne de l'étouffement est de 118 heures (Tableau 3.10). Elle est déterminée lorsque le grain devient fragile à la suite de la désagrégation tissulaire. La durée d'étouffement varie significativement (CV= 26,13%) du fait de l'état physiologique des grains. La température d'étouffement varie selon les niveaux de la couche des grains : elle est de 49°C en moyenne en surface, 48,5°C au cœur et 43°C au fond de la couche (Tableau 3.11).

Ces températures sont relativement constantes au cœur (CV = 4,57%) et au fond de la couche des grains (CV = 4,2%). Elles augmentent spontanément au cours du processus pour atteindre des valeurs maximales respectivement en surface, au cœur et au fond, puis décroissent en fin de processus (Tableau 3.11).

Tableau 3.11 : Evolution de la température dans la couche des grains de maïs germés au cours de l'étouffement

Durée (h)	En surface			Au cœur			Au fond		
	M	Σ	CV (%)	M	Σ	CV (%)	M	Σ	CV (%)
0	31,70	1,40	4,38	31,80	1,44	4,54	31,70	1,39	4,38
2,5	40,50	1,00	2,47	39,5	0,80	2,02	35,50	0,50	1,41
25	47,30	2,62	5,55	44,30	2,24	5,06	39,30	2,24	6,16
46	46,00	3,53	7,67	45,00	4,21	9,36	40,70	4,60	11,31
71	49,00	2,24	4,57	48,50	2,24	4,62	40,80	3,34	8,19
94	47,50	1,73	3,34	48,50	1,73	3,57	43,00	1,73	4,02
118	43,00	1,00	2,32	39,50	2,50	6,33	36,50	2,50	9,35

M = Moyenne arithmétique de 16 cycles de maltage ; Σ = Ecart-type ; CV = Coefficient de variation en %

4.6 - Préparation de la pâte de *foufou*.

La vinasse chaude utilisée pour la cuisson du *foufou* est initialement à $97,8^{\circ}\text{C} \pm 0,58^{\circ}\text{C}$; cette température est standardisée (CV = 0,59%). La vinasse chaude contenue dans la chaudière est diluée avec de l'eau tiède du bac de condensation : la température décroît à $82,52^{\circ}\text{C} \pm 3,29^{\circ}\text{C}$ (CV = 3,99%) ; c'est à cette température que le *foufou* sera transformé en pâte par la cuisson (Tableau 3.12).

Tableau 3.12 : Conditions de préparation du *foufou*.

Paramètres	Valeurs statistiques		
	M	Σ	CV (%)
Température de la vinasse initiale (°C)	97,8	0,58	0,59
Température de la vinasse diluée (°C)	82,52	3,29	3,99
Durée de repos de refroidissement de la pâte (h)	25,52	6,78	23,77
Température de la pâte refroidie (°C)	27,7	2,62	9,48

M = Moyenne arithmétique de 12 cycles de fermentation. ; Σ = Ecart-type ;

CV = Coefficient de variation en %.

Après cuisson, la pâte est refroidie à $27,7^{\circ}\text{C}$ (CV = 9,48%) au bout de 25,52 heures $\pm 6,78$ heures. La durée de repos pour le refroidissement est relativement variable (CV = 23,77%). La pâte cuite de *foufou* refroidie est fluidisée avec de l'eau pour obtenir

une bouillie. La composition de la bouillie prête à la fermentation varie significativement en fonction de la formule pratiquée à l'empâtage.

4.7- La fermentation

La température évolue au cours de la fermentation. De $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ au début de la fermentation, elle monte à 31°C puis descend à $27^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ en fin de fermentation. La fermentation est mise en œuvre dans des fûts (Figure 2.1) de 220 litres et dure $84,73\text{h} \pm 11,19\text{h}$ (Tableau 3.13). En fin de processus, il s'opère une décantation naturelle et une diminution de la viscosité du surnageant dont le volume moyen est de 57,47% contre 42,30% pour le dépôt qui demeure encore assez visqueux. La saccharification est incomplète : le test à l'iode est positif pour le dépôt visqueux et le surnageant. Le pH final, assez constant (CV= 1,73%), est de 3,46 en moyenne (Tableau 3.13).

La population de levures d'environ $31,70 \times 10^6$ UFC /ml au début de la fermentation est maximale (51×10^6 UFC/ml en moyenne) après 25 heures de fermentation. Elle décroît par la suite à $16,76 \times 10^6$ UFC/ml environ après 96 heures de fermentation (Tableau 3.13 et Figure 3.6).

La densité du moût diminue au cours de la fermentation et se stabilise après 72 heures marquant ainsi la fin du processus de fermentation (Figure 3.6). L'acidité du moût augmente régulièrement et tend à se stabiliser après 72 heures de fermentation (Figure 3.6) en accord avec le pH du moût qui diminue de façon régulière à cause probablement d'un fort pouvoir tampon, et tend à se stabiliser après 48 heures de fermentation.

Tableau 3.13 : Caractéristiques de la fermentation traditionnelle

Etapas opératoires	Paramètres	Valeurs statistiques				
		M	Σ	CV (%)	Min	Max
Empâtage	Eau (qsp) (l)	178,25	19,45	10,91	157	220
	Foufou (g/l)	101,95	12,50	12,26	88	115
	Malt de maïs (g/l)	37,20	5,70	15,31	31	44
	Pied de cuve (g/l)	12,90	3,03	23,47	9,8	16
	Sucre de canne (g/l)	15,50	3,48	22,46	12	19
	Levure (g/l)	0,39	0,015	3,75	0,38	0,42
Fermentation	Volume final (l)	176,00	26,26	15,09	149	205
	Volume de surnageant (%)	57,47	0,62	1,075	56,8	58,2
	Volume du dépôt (%)	42,30	0,32	0,76	41,9	43,7
	Durée (h)	84,73	11,19	13,20	73	96
	CIL (10^6 UFC/ml)	31,70	5,80	18,29	24	38
	CFL (10^6 UFC/ml)	16,88	3,66	21,14	12	21
	pH final	3,46	0,06	1,73	3,38	3,68

M = Moyenne arithmétique de 12 cycles de fermentation ; Σ = écart-type ;

CV = Coefficient de variation en % ; UFC/ml = Unité formant colonie par millilitre ;

CIL = Concentration initiale de levures en suspension ;

CIF = Concentration finale de levures en suspension.

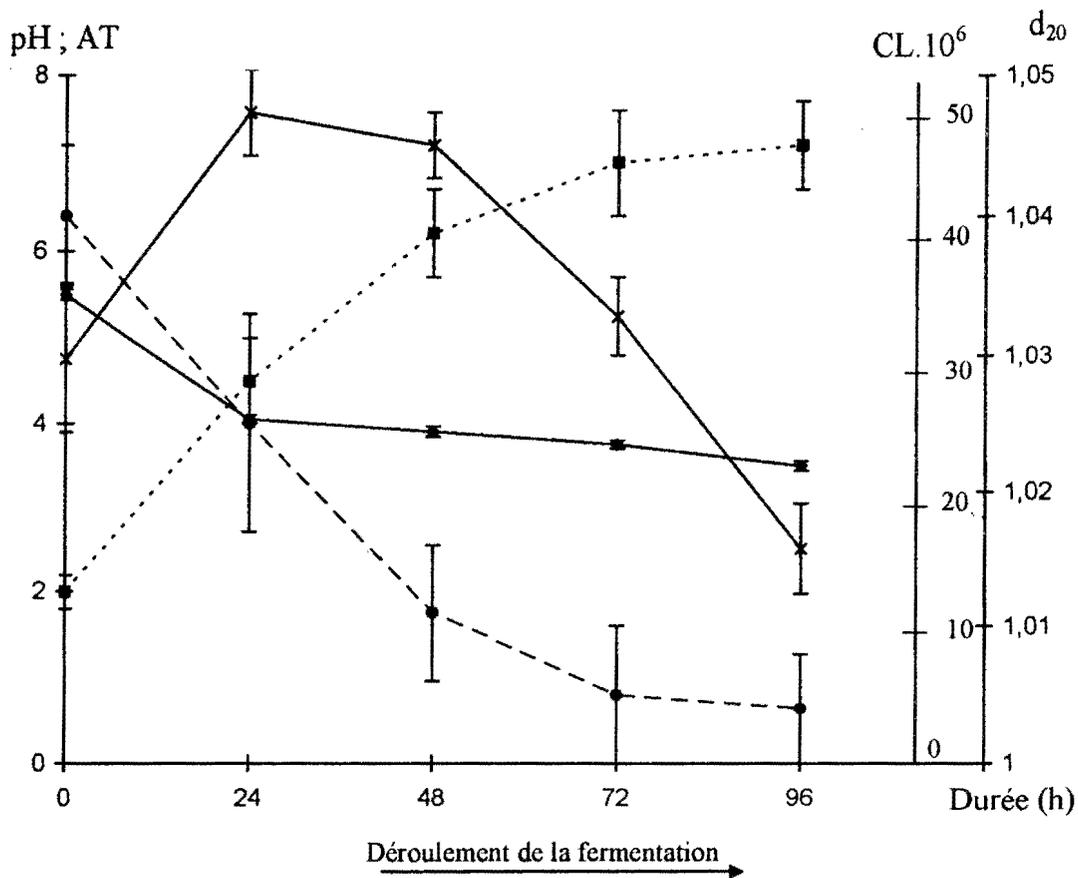


Figure 3.6 : Cinétique de la fermentation (température du moût : 29°C - 31,5°C)

- : d_{20} = densité à 20°C en g/ml ;
- : pH ; —×— : $CL \times 10^6$ = Concentration cellulaire de levures en suspension (10^6 UFC/ml)
- - -■ - - : AT = acidité titrable en ml de NaOH 0,1N
- ⌈ : Variation standard; CV = Coefficient de variation en %

4.8 - La distillation.

La distillation est réalisée en deux étapes : la prédistillation ou phase préparatoire de vaporisation et la distillation proprement dite (Tableau 3.14).

La durée du cycle de distillation est 339,33 minutes environ et celle de la prédistillation est de 110 minutes en moyenne; elles sont relativement constantes. Cependant, la distillation proprement dite se caractérise par une durée moyenne de 229,5 minutes qui reste très variable.

La température maximale atteinte pendant la prédistillation est de 59°C. Les températures de sortie des vapeurs au niveau du tuyau de condensation et d'apparition des premières gouttes de distillat sont respectivement de 62,75°C et de 71,25°C.

Toutes ces températures sont très variables (CV compris entre 18,4% et 26,32%) (Tableau 3.14).

La distillation proprement dite présente un diagramme de température à 4 paliers croissants et réguliers (Tableau 3.15), de durée très variable à partir de $94,35^{\circ}\text{C} \pm 1,48^{\circ}\text{C}$.

Tableau 3.14 : Durée et température d'un cycle de distillation de *boganda*

Etapes de distillation	Valeurs statistiques				
	M	Σ	CV (%)	Min	Max
Prédistillation (mn)	109,83	7,44	6,77	90	123
Distillation (mn)	229,5	39,87	17,37	182	300
Cycle de distillation (mn)	339,33	29,88	8,80	295	395
Température maximale de la prédistillation ($^{\circ}\text{C}$)	59	10,86	18,4	38	70
Température de sortie de vapeurs ($^{\circ}\text{C}$)	62,75	14,8	23,59	47	78,5
Température d'apparition de 1 ^{ères} gouttes ($^{\circ}\text{C}$)	71,25	18,75	26,32	52,5	92

M = Moyenne arithmétique de 12 cycles de distillation,

Σ = Ecart-type ; CV = Coefficient de variation en %.

Le distillat est recueilli par fractions de volume et de dose alcoolique correspondant aux paliers de température allant de $94,35^{\circ}\text{C}$ à $97,62^{\circ}\text{C}$ (Tableau 3.15). Le débit d'écoulement du distillat varie d'une fraction à l'autre (CV compris entre 13,71% et 29,07%). Le nombre de fractions et les volumes recueillis varient de manière significative (CV compris entre 14,29% et 93,33%) d'un cycle de production à l'autre (Tableau 3.15). Suivant les cycles de distillation, on peut recueillir 3, 4, 5, 6 voire 7 fractions de volume de distillat de dose alcoolique différente.

L'acidité des fractions de volume de distillat augmente de la première fraction (2,2 ml de NaOH 0,1N) à la quatrième (3,1 ml de NaOH 0,1N/5ml de distillat) de façon relativement significative (CV compris entre 8,89 % et 10,42 %) (Tableau 3.15).

Tableau 3.15 : Caractéristiques de distillation traditionnelle

Paramètres	Paliers de température de distillation											
	1 ^{er}			2 ^{ème}			3 ^{ème}			4 ^{ème}		
	M	Σ	CV(%)	M	Σ	CV(%)	M	Σ	CV(%)	M	Σ	CV(%)
Température en °C	94,35	1,48	1,57	96,29	0,52	0,54	97,04	0,63	0,65	97,95	0,30	0,31
Durée des paliers de température (mn)	18,86	4,01	21,26	49,5	29,45	59,49	102,25	50	48,9	47,12	46	97,62
Titre alcoométrique en °GL	35	3,5	10	31,7	3,86	12,18	25,5	2,5	9,80	13,6	2,5	18,38
Débit de l'écoulement (ml/mn)	63,22	8,67	13,71	53,56	15,57	29,07	42,71	10,40	24,35	43,41	10,79	24,86
Volume des fractions (litres)	0,98	0,14	14,29	2,35	1,33	56,59	3,815	1,27	32,29	2,1	1,96	93,33
Acidité titrable (ml de NaOH 0,1N/5ml)	2,2	0,21	9,54	2,25	0,2	8,89	2,4	0,25	10,42	3,1	0,3	9,68

M = Moyennes arithmétiques de 12 cycles de distillation ; Σ = écart-type ;

CV(%) = coefficient de variation en %.

Les premières gouttes apparaissent à 70,7°C ± 8,36 °C.

La quantité du *boganda* obtenue par coupage des trois premières fractions est d'environ 9,62 litres (CV = 13,2%) pour un cycle de distillation (Tableau 3.16). La quatrième fraction peut rentrer dans le coupage si elle titre au moins 15°GL. Cette eau-de-vie présente un titre alcoométrique moyen de 22,56°GL quoique assez variable (CV= 17,73%) et a un pH d'environ 3,68 suffisamment constant (CV= 3,36 %), une acidité d'environ 1,93 ml de NaOH 0,1N assez constant (CV= 10,36%) et une turbidité de 2,51°EBC très variable d'un cycle de distillation à un autre (CV= 50,5%).

Tableau 3.16 : Caractéristiques physico-chimiques du *boganda* (eau-de-vie) obtenu après coupage des fractions de distillat

Paramètres	Valeurs statistiques				
	M	Σ	CV (%)	Min	Max
Titre alcoométrique (°GL)	22,56	4	17,73	18	28
pH	3,68	0,12	3,36	3,40	3,85
Acidité titrable (ml de NaOH 0,1N/5ml)	1,93	0,2	10,3	1,90	2,2
Turbidité (°EBC)	2,51	1,27	50,5	1,20	4,36
Volume pour un cycle de distillation (litres)	9,62	1,27	13,2	8,30	13

M = Moyenne arithmétique de 12 cycles de distillation ; Σ = écart-type

CV = Coefficient de variation en % ;

EBC = European Brewery Convention

Le *boganda*, boisson traditionnelle alcoolisée, est trouble ; il est aussi acide probablement à cause de la présence d'acidité volatile provenant de l'activité de bactéries acétiques lors de la fermentation.

II- Optimisation des conditions de production du *boganda*

Les résultats de l'enquête et les études sur le procédé de production du *boganda* ont permis (Figures 3.14 et 3.15) de caractériser les paramètres de la fermentation alcoolique et les métabolites du *boganda*, une eau-de-vie à base de manioc, ainsi que la variabilité.

La présente partie traite de l'étude d'un certain nombre de paramètres en vue de l'optimisation du procédé aux fins de réduire la variabilité.

A- Maltage du maïs

Il a été étudié en vue d'obtenir un malt plus régulier et homogène.

1- Evolution de l'absorption d'eau des grains au cours du trempage du maïs.

L'augmentation de la masse des grains permet de suivre l'absorption de l'eau dans les grains au cours du processus de trempage du maïs (Figure 3.8).

Plus les grains ont été stockés longtemps, plus ils absorbent de l'eau au cours du processus de trempage : 33,5 % d'eau absorbée par les grains d'un stock de 3 mois contre 37,5% dans le cas de ce stock à 6 mois pour la variété Sibiti (Figure 3.8). La tendance est la même pour les variétés de maïs testées. La variabilité de l'absorption d'eau par le grain dépend des conditions de stockage en rapport avec la durée de stockage (Figure 3.9).

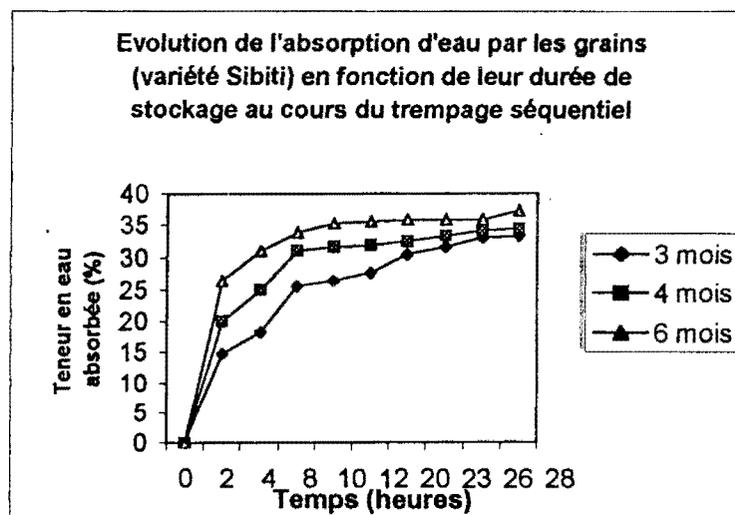
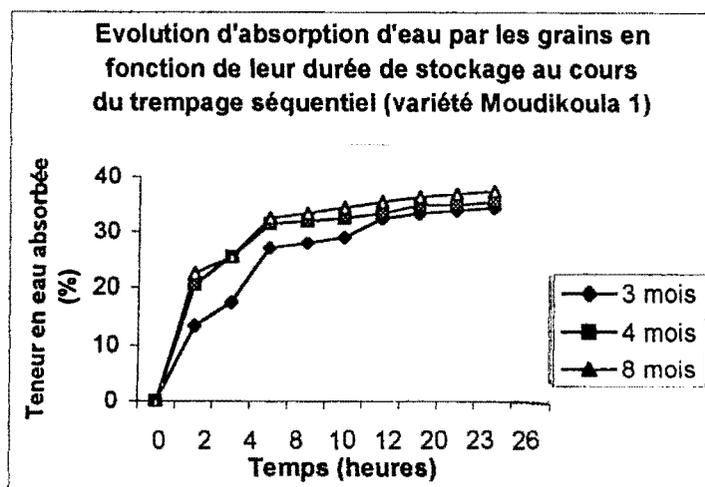
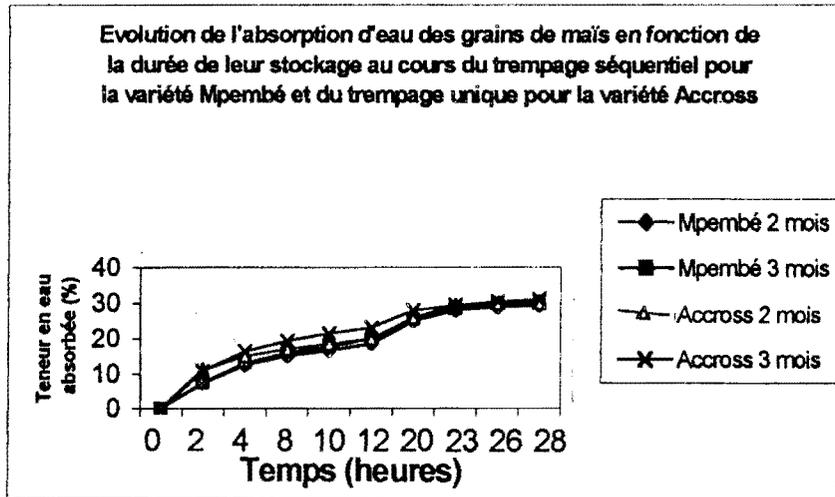


Figure 3.8 : Evolution de l'absorption d'eau par les grains au cours du trempage de maïs en relation avec la durée de stockage de chaque variété.

Conditions : température opératoire : 30°C - 34°C .

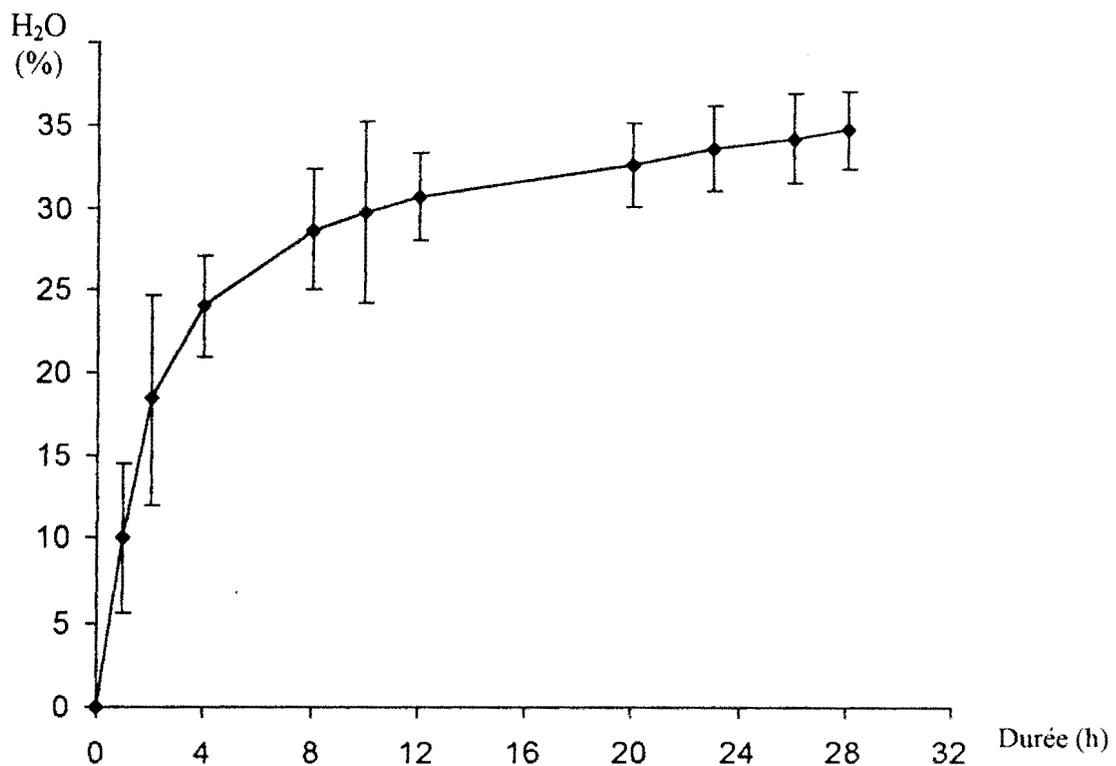


Figure 3.9: Variabilité de l'absorption d'eau au cours du trempage de grains (variété Accross)
Conditions : température opératoire 30°C - 34°C ; trempage séquentiel
Trois lots de maïs provenant d'un stockage plus ou moins long (2, 3 et 6 mois)
I : Variation standard relative à la durée de stockage de grains (2, 3, 4, 6 et 8 mois). La limite supérieure correspond à la durée de stockage la plus longue et la limite inférieure à la durée la plus courte

La cinétique d'absorption d'eau par le grain présente trois phases : la phase d'absorption rapide dans les 4 premières heures du trempage, la phase de ralentissement entre 8 et 12 heures et la phase constante au-delà de 12 heures.

Le taux maximal d'absorption d'eau est obtenu dans la première phase (91,7 mg d'eau / g de grain /h) et le terme du processus de trempage est apprécié au cours de la troisième phase (en moyenne 2,5 mg d'eau absorbée par gamme de grain et par heure).

2 - Evolution du pH au cours du trempage.

Une diminution du pH est observée (Tableau 3-14) pour les deux modes de trempage : le pH passe de 6,44 à 4,28 pour le trempage unique et de 6,50 à 4,71 pour le trempage séquentiel au bout de 28 heures. Cette diminution du pH est rapide pendant les deux premières heures du trempage (Tableau 3.17).

L'acidité titrable augmente progressivement au cours du trempage unique de grains de maïs de la variété Accross provenant d'un stockage de 2 mois et de 3 mois (Figure 3.10). Cette progression est relativement plus élevée dans les cas des grains provenant d'un stockage de 3 mois.

Tableau 3.17 : Evolution du pH de la trempage suivant le mode de trempage de maïs.

Conditions : température opératoire : 30°C - 34°C ;

Durée (h)	0	2	4	10	22	25	28
pH _{Tu}	6,44	5,85	5,81	5,63	4,34	4,32	4,28
pH _{Ts}	6,50	6,03	6,17*	5,85*	4,38	5,41*	4,71

Valeurs moyennes des essais réalisés en triple ; pH_{Tu} = pH au cours du trempage unique, pH_{Ts} = pH au cours du trempage séquentiel ; (*): valeur après renouvellement d'eau de trempage.

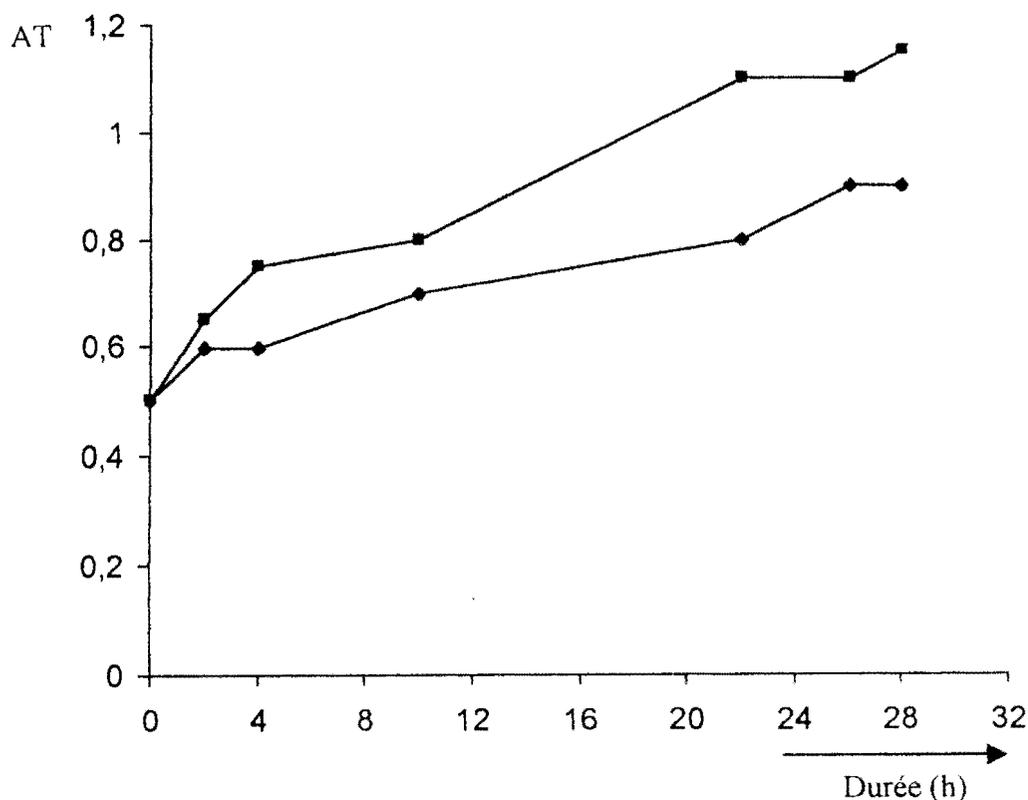


Figure 3-10: Evolution de l'acidité titrable au cours du trempage unique.

Conditions : température opératoire 30°C - 34°C ; variété de maïs : Accross ;

AT = acidité titrable en ml de NaOH 0,1N/5ml ;

(▪) : grains provenant d'un stockage de 3 mois ;

(◊) : grains provenant d'un stockage de 2 mois.

3. Influence du mode de trempage sur la germination des grains de maïs

Les modes de trempage unique et de trempage séquentiel montrent une différence notable sur le taux de germination pour chaque variété de maïs considérée (Figure 3.11). Pour un stock donné d'une variété de maïs, la germination est plus efficace avec les grains provenant d'un trempage séquentiel qu'avec ceux du trempage unique. Au bout de 120 heures de germination du maïs de la variété Moudikoula 1, 11,16 % des grains ont germé suivant le trempage séquentiel contre 7,99 % selon le trempage unique. Dans le cas de la variété Accross, 89 % de grains provenant du trempage séquentiel ont germé contre 83,28 % selon le trempage unique au bout de 96 heures de germination. Dans tous les cas de germination, le taux de grains germés est plus important pour le trempage séquentiel que pour le trempage unique.

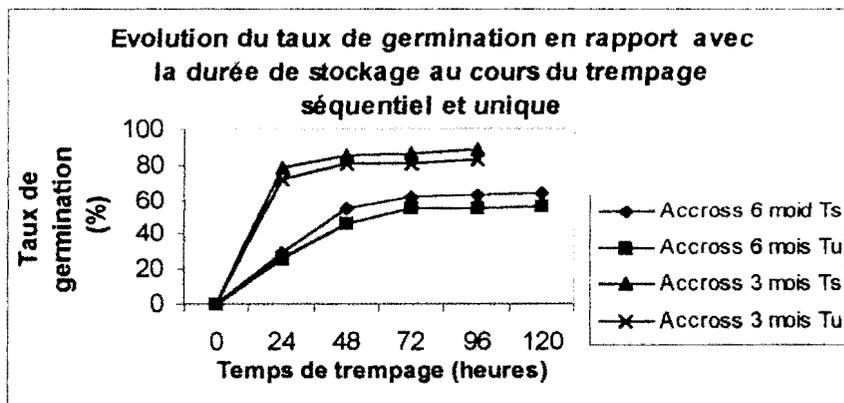
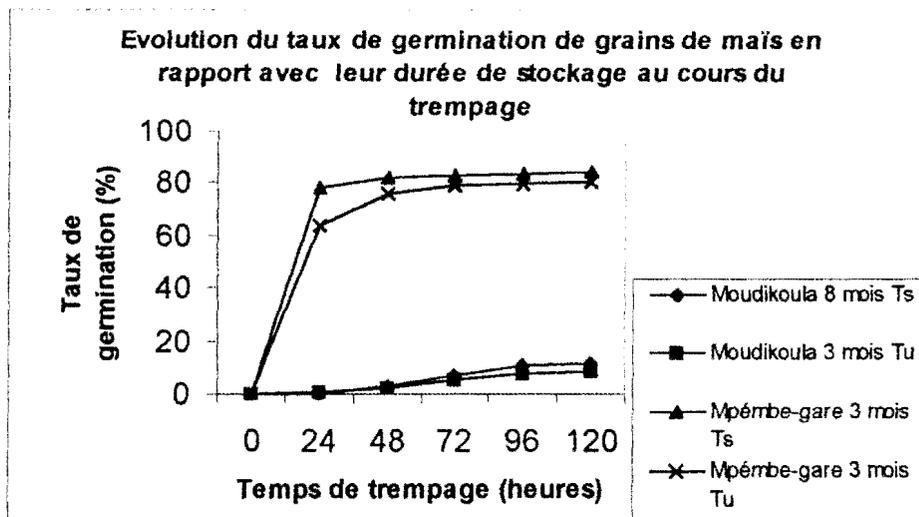


Figure 3.11: Effet du mode de trempage sur la germination du maïs. Conditions : température ambiante 26°C - 28°C ;

Le déroulement de la germination est en relation avec la durée de stockage (Figure 3.12)

La fin de la germination est appréciée lorsque le taux de germination atteint une limite : 9,6 % après 120 heures pour un stock de 8 mois et 86 % en 96 heures pour stock de 3 mois de la variété Accross. Le taux de germination maximal est atteint plus rapidement lorsque la durée de stockage de grains est plus courte.

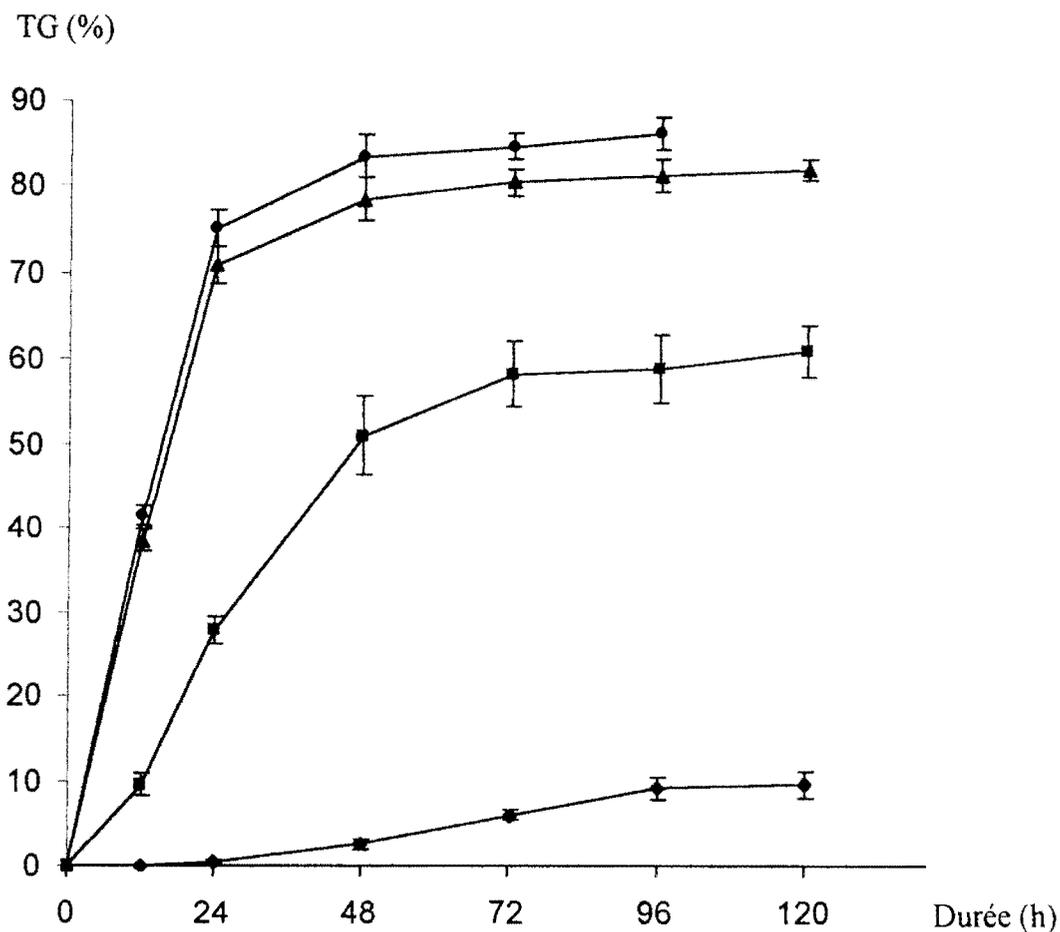


Figure 3.12 Appréciation du terme de la germination ; variété de maïs Accross
 Essai en triple ; TG (%) : taux de germination en pourcentage de grains ;
 Grains provenant d'un stockage de :
 (●) : 3 mois ; (▲) : 4 mois ; (■) : 6 mois ; (◆) : 8 mois

4 - Influence du mode de trempage sur le développement des organes de croissance au cours de la germination du maïs.

Au cours de la germination du grain de maïs, des organes de croissance (plantule, radicule et radicelles) se développent. Quel que soit le mode de trempage (trempage unique et trempage séquentiel), la radicule sort en premier lieu, ensuite apparaissent la plantule et les radicelles (Figure 3.13). Après 24 heures de germination, il a été noté l'apparition de la radicule et d'un début de la plantule, la radicule mesurant 4 mm et la plantule 1 mm. Cependant, aucune apparition de radicelles n'est observée en 24 heures, mais leur présence est notée, entre 4 et 6 radicelles, à partir de 48 heures. En fait, la radicelle la plus grande s'allonge beaucoup plus que la plantule à partir de 48 heures (14,3mm pour la radicelle la plus longue et 8,4 mm pour la plantule). Le

processus de germination tend vers un excès de développement des organes de croissance au-delà de 48 heures dans les conditions opératoires de température (26-28°C).

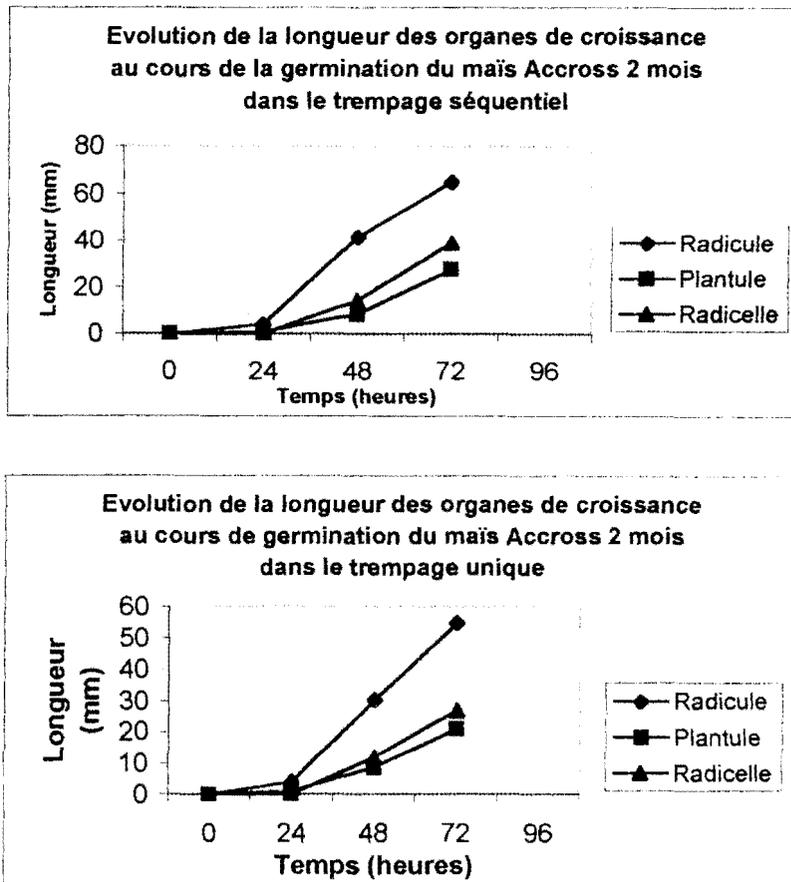


Figure 3.13 : Evolution de la longueur des organes de croissance au cours de la germination du maïs selon le mode de trempage

5 - Etouffement de grains germés.

Pour des raisons technologiques, le développement des organes de croissance doit être limité afin d'éviter les pertes de matière et l'apparition d'arômes et de goûts indésirables. Ainsi, la germination est arrêtée par étouffement des grains germés dans des conditions d'anaérobiose tout en permettant l'augmentation des activités enzymatiques du malt.

Cette phase qui conduit à une augmentation de la température jusqu'à 50°C, à l'arrêt du développement du grain et à la mort du germe par asphyxie favorise la potentialisation des activités enzymatiques du malt de maïs et le ramollissement des grains.

Le ramollissement est un facteur recherché par les producteurs traditionnels de *boganda* pour l'appréciation de la qualité du malt de maïs. Les grains de malt vert sont ramollis pendant l'étouffement et ce ramollissement serait dû à la désagrégation des tissus indiquée par le nombre des grains plongeurs en utilisant la technique de l'épreuve à l'eau dont le bon indice doit être inférieur à 30 % de grains plongeurs.

Le degré de ramollissement résultant de désagrégation du malt est en rapport avec le mode de trempage des grains de maïs avant la germination (Tableau 3.18).

A l'exception du couple d'essais I, le ramollissement des grains du malt de maïs issus du trempage unique est plus poussé que celui des grains provenant du trempage séquentiel : 20,75% de grains plongeurs pour le trempage unique contre 32% pour le trempage séquentiel selon le couple d'essais IV. La même tendance a été observée pour les couples II et III. L'importance de la désagrégation des grains de malt serait probablement liée à la durée de stockage du maïs : 18,5% de grains de malt plongeurs provenant du maïs stocké pendant 6 mois et 9,75% de grains de malt plongeurs pour le maïs stockés pendant 8 mois dans le cas du trempage unique.

Tableau 3.18 : Appréciation de la désagrégation du malt selon la méthode d'épreuve à l'eau de la radicelle la plus longue (Variété Accross de durée de stockage variable)

Couples d'essais	Durée de stockage du maïs (mois)	Mode de trempage du maïs	Nombre de grains plongeurs sur 100 après Trois (3) et dix (10) minutes		
			Après 3 min (%)	Après 10 min (%)	Tendance (%)
I	2,0	Tu	40	49	44,5 ± 4,5
	2,0	Ts	42	43,5	42,75 ± 0,75
II	3,0	Tu	32,5	31,5	32 ± 0,5
	3,0	Ts	41,5	36	38,75 ± 2,75
III	4,2	Tu	23	21	22 ± 1,0
	4,2	Ts	27	29,5	28,25 ± 1,25
IV	4,8	Tu	25	16,5	20,75 ± 4,25
	4,8	Ts	38	26	32 ± 6,0
V	6,0	Tu	14,5	22,5	18,5 ± 4,0
VI	8,0	Tu	11,5	8	9,75 ± 1,75

Tu : trempage unique ; Ts : trempage séquentiel

6- Développement de l'activité α -amylasique au cours du maltage.

Au cours du maltage de maïs, il y a développement de l'activité amylasique caractérisée par le pouvoir de solubilisation de l'amidon. La teneur en α -amylase est un facteur important dans la transformation biochimique lors du brassage.

L'activité α -amylasique, très faible à la fin de trempage du maïs (26 U/g MS) (Tableau 3.5), augmente au cours de la germination avec 158 U/g MS en fin de germination pour le trempage unique et 217 U/g MS pour le trempage séquentiel. Il en est de même au cours de l'étouffement des grains germés : l'activité α -amylasique est de 258 U/g MS en fin d'étouffement pour le trempage unique et de 240 U/g MS pour le trempage séquentiel.

Tableau 3.5 : Evolution des paramètres physicochimiques et de l'activité α -amylasique des grains au cours du maltage de maïs (variété Accross, 3 mois de stockage)

		Etapas de transformation du maïs au cours du maltage				
		Trempage		Germination	Etouffement	
Durée (h)		0	28	48	72	144
Humidité (%)	Tu	12,80 (0,54)	12,21 (0,6)	11,45 (0,34)	9,28 (0,06)	8,34 (0,57)
	Ts	12,80 (0,54)	12,16 (0,53)	10,97 (0,57)	8,63 (0,94)	8,34 (0,09)
Masse de 1000 grains (g)	Tu	272 (2,1)	268 (1,8)	261,62 (2,4)	218,55 (0,8)	216,01 (1,61)
	Ts	272 (2,1)	268 (2,1)	258,31 (1,8)	217,5 (1,8)	216 (2,1)
Nombre de grains plongeurs (%)	Tu	100	100	45,93 (4,4)	35,6 (1,4)	32 (0,5)
	Ts	100	100	50,96 (0,76)	40,1 (1,75)	38,75 (2,75)
Activité α -amylasique (U/gMs)	Tu	ND	26,07 (0,8)	158,12 (1,84)	215,19 (1,84)	258,11 (1,1)
	Ts	ND	26,10 (1,2)	217,5 (2,3)	226,73 (2,73)	240,04 (2,2)
Activité α -amylasique (U/1000 grains)	Tu	ND	6986,76	41367,35	47029,78	55754,34
	Ts	ND	6994,8	56182,43	49313,78	51848,64

- Valeurs moyennes d'essais répétés 3 fois ; () : écart-type ;
- Tu = trempage unique ; Ts = Trempage séquentiel ;
- U/gMS : unité d'enzymes par gramme de matière sèche ;
- U/1.000 grains : unité d'enzymes pour 1.000 grains ;
- ND : non déterminé car pas précis.

L'activité α -amylasique est exprimée en unité enzymatique par 1.000 grains afin de mieux comparer les résultats au cours du processus

.B- Optimisation de la conduite de la fermentation

La fermentation a été réalisée dans un microfermenteur cylindroconique (Figure 3.14) conçu de manière à :

- pouvoir opérer la charge de moût et le prélèvement d'échantillons (pour analyse) dans les conditions stériles ;
- permettre le déroulement du processus dans une atmosphère isolée et contrôlable ;
- permettre de mesurer la température du moût pendant l'opération ;
- pouvoir récupérer les phases du milieu de fermentation séparément et de faire la vidange par gravité.

Une batterie de quatre microfermenteurs a été utilisée pour la réalisation des essais de fermentation en série dans une enceinte à température contrôlée.

1 - Evolution du moût en fonction de la teneur en *foufou* au cours de la fermentation

Dans la formulation du moût, divers ratios *foufou*/malt allant de 1/1 à 8/3,2 ont été utilisés. Pour le levurage, la souche commerciale de *Saccharomyces cerevisiae* a été utilisée à raison de $26,9 \times 10^6$ UFC par millilitre de moût (Tableau 3.19).

Au cours de la fermentation, la viscosité et la densité du moût diminuent progressivement jusqu'à une limite qui marque le terme du processus. Par contre la température augmente rapidement les premières heures et se stabilise à la valeur de la fermentation ; elle descend ensuite progressivement au terme du processus.

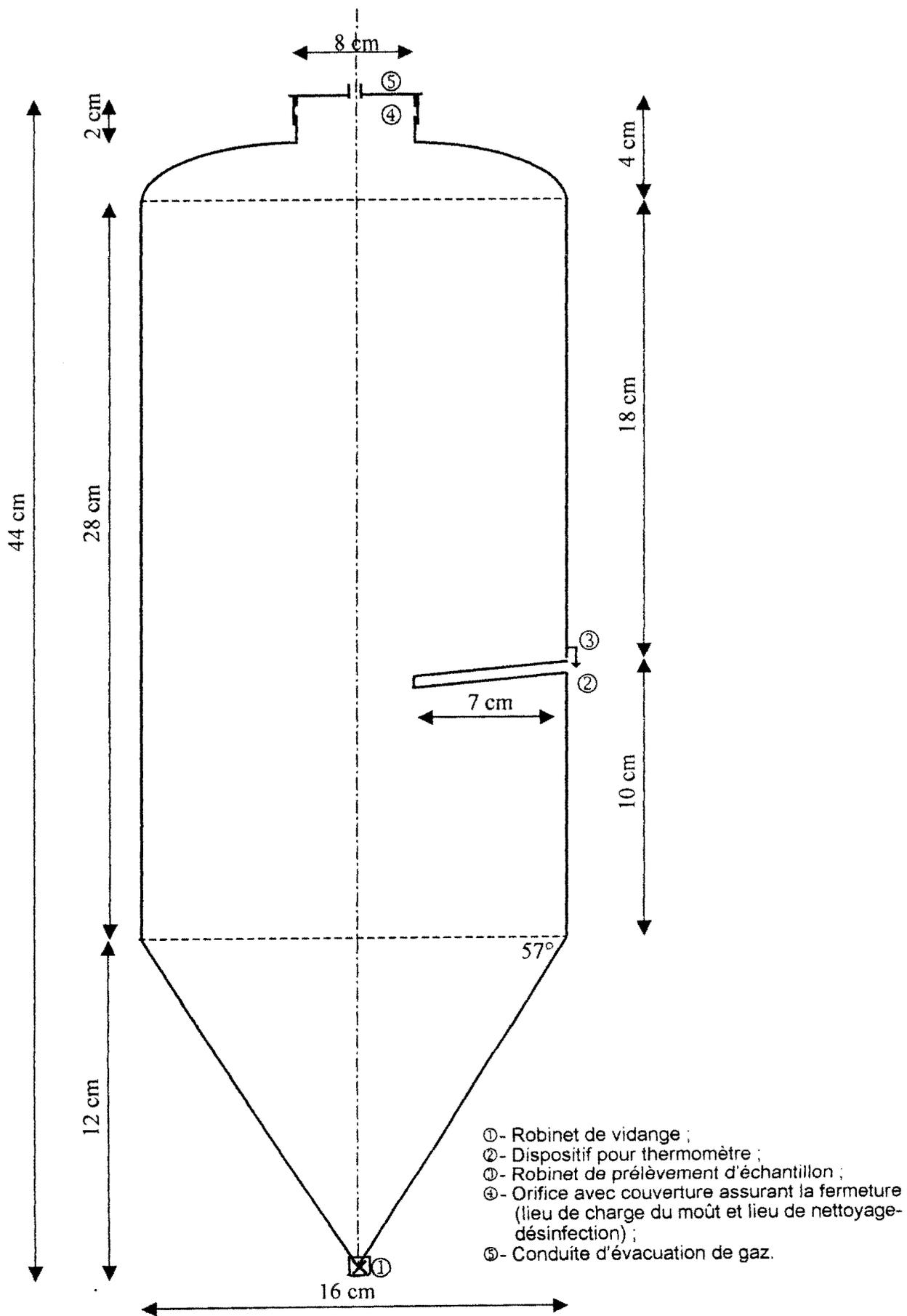


Figure 3.14 : Coupe longitudinale d'un fermenteur cylindroconique (volume intérieur : 6 litres)

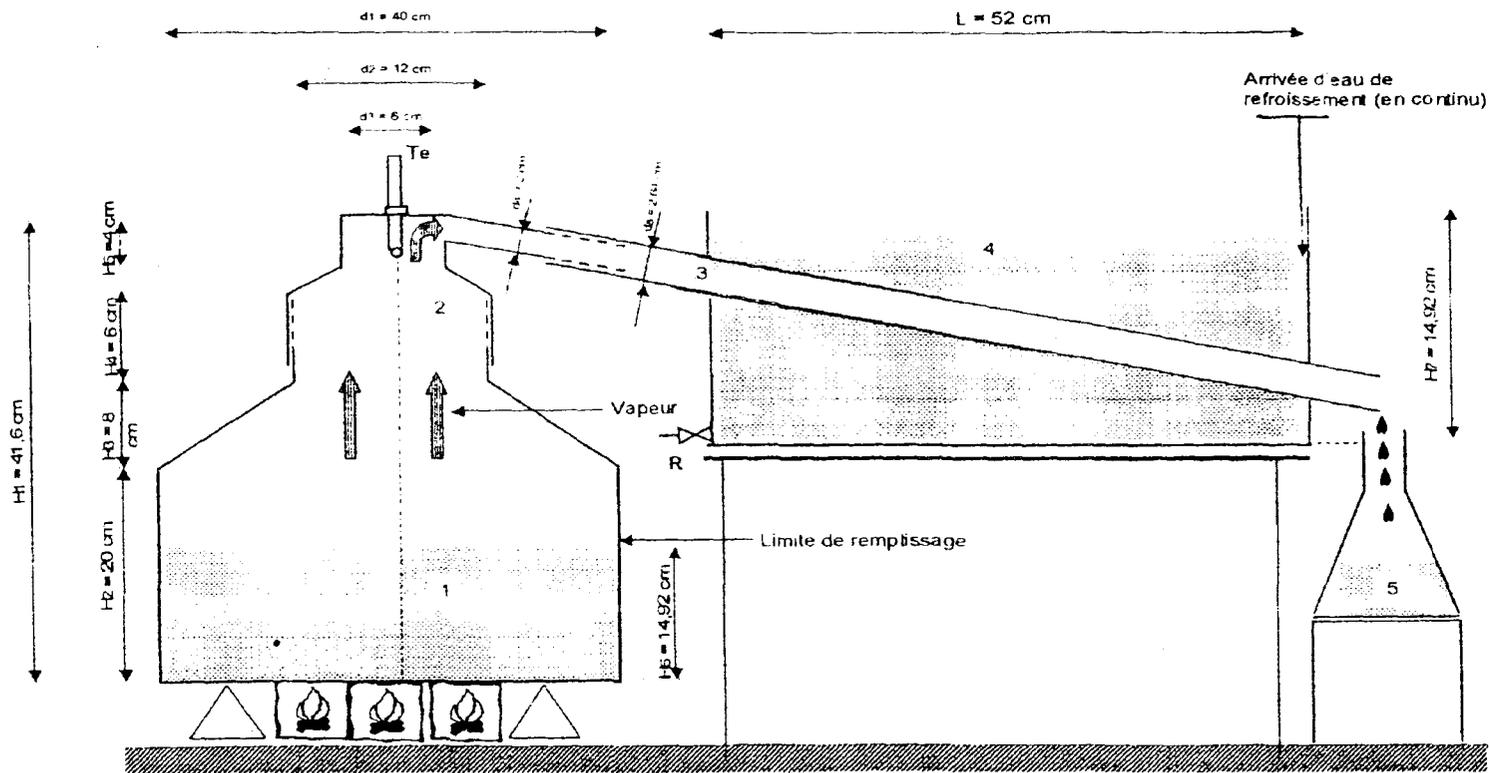


Figure 3.15 : Coupe transversale d'un microdistillateur d'essais

Echelle 1/4^e : dimensions en centimètre.

1- Chaudière (charge maximale : 20 litres) ;

2- Chapeau de la chaudière à prise de thermomètre ;

3- Conduite de la vapeur et du distillat ;

Te : Thermomètre de mesure de température de la vapeur ;

4- Bac d'eau de refroidissement ;

5- Fiole jaugée pour fraction de distillat ;

R : robinet de vidange d'eau (en continu pour la régulation de la température d'eau du bac de refroidissement).

Tableau 3.19 : Evolution du moût de *boganda* en fonction du ratio *foufou*/malt, au cours de la fermentation du *boganda*.

Conditions : taux de levurage $26,9 \times 10^6$ UFC/ml de moût ;

Température de fermentation : 26°C à 28°C.

Durée de la fermentation (h)	Ratio <i>foufou</i> /malt (w/w) pour formation du moût						
	R ₁ : 1/1	R ₂ : 2/1	R ₃ : 2,5/1	R ₄ : 4/1,6	R ₅ : 5/2	R ₆ : 7/2,8	R ₇ : 8/3,2
	d ₁ (g/ml)	d ₂ (g/ml)	d ₃ (g/ml)	d ₄ (g/ml)	d ₅ (g/ml)	d ₆ (g/ml)	d ₇ (g/ml)
0	1,0185	1,0345	1,0345	ND	ND	ND	ND
24	1,006	1,014	1,018	ND	ND	ND	ND
48	0,999	1,006	1,007	ND	ND	ND	ND
72	0,998	1,002	1,001	ND	ND	ND	ND
96	0,998	0,998	1,000	1,007	1,009	ND	ND
120	-	0,998	1,000	1,003	1,004	ND	ND
144	-	-	-	1,000	1,000	ND	ND
168	-	-	-	1,000	1,000	1,009	1,010
192	-	-	-	-	-	1,008	1,010

- données représentant les moyennes des essais répétés 4 fois (erreurs standard faibles avec CV < 0,1%).
- ND : non déterminé parce que moût épais ;
- d : densité du moût en g/ml.

La densité initiale du moût du *boganda* n'est déterminée que pour des valeurs du ratio *foufou*/malt inférieures à 3,3/1, au-delà de ce ratio le moût est épais et la densité non déterminée. La densité initiale du moût est plus basse pour les faibles ratios *foufou*/malt (1,018g/ml pour le ratio 1/1 et 1,044g/ml pour la ratio 2,5/1). Au cours de la fermentation elle diminue jusqu'à une limite inférieure marquant le terme du processus qui est plus élevé lorsque le ratio est important. La durée du processus est plus longue en cas de ratio important. Il y a fluidisation significative du moût. Le test à l'iode a été négatif pour les moûts plus légers et positifs pour les moûts beaucoup plus denses.

La distillation du moût fermenté a été conduite moyennant l'utilisation d'un distillateur (Figure 3.15) conçu pour permettre le contrôle de la température des vapeurs et de pouvoir réguler le chauffage pendant l'opération. L'alimentation en eau de refroidissement et la vidange d'eau chaude se font en continu.

Pour chaque cycle de distillation (Figure 3.15), le distillat est recueilli par fractions de volume défini et le titre alcoométrique ensuite mesuré. Les fractions de volume se présentent comme suit : première fraction $F_1 = 115\text{ml}$, deuxième fraction $F_2 = 135\text{ml}$, troisième fraction $F_3 = 150\text{ml}$, quatrième fraction $F_4 = 170\text{ml}$, cinquième fraction $F_5 = 235\text{ml}$, et sixième fraction $F_6 = 240\text{ml}$ (Figure 3.16).

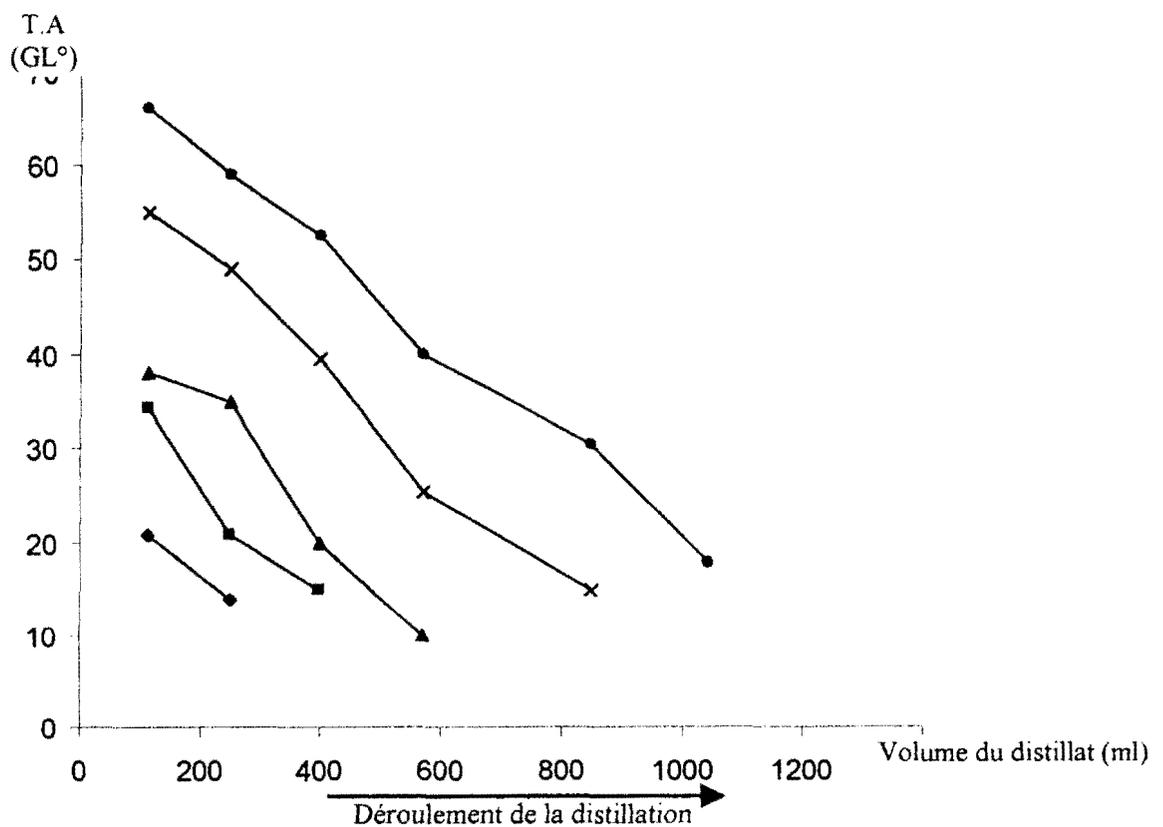


Figure 3.16 : Evolution du titre alcoométrique du distillat provenant des moûts des différents ratios *foufoulmalt* (Essai répétés 4 fois ; erreurs standard très faibles avec $CV < 5\%$)

CV : Coefficient de variation ; TA : Titre alcoométrique en degrés Gay Lussac.

(◆) : Essai avec ratio 1/1 ; (■) : ratio 2/1 ; (▲) : ratio 2,5/1 ; (×) : ratio 5/2 ; (●) : ratio 8/3,2

Les résultats montrent qu'un grand nombre de fractions de distillat ayant un titre alcoométrique supérieur à 20°GL est obtenu en utilisant des ratios fougou/malt plus élevés (5 fractions de distillat pour le ratio 8/3,2 contre une seule pour le ratio 1/1). Cela indique que plus le moût est dense en raison d'une forte teneur en fougou plus il y a formation d'éthanol. Le titre alcoométrique diminue de la première fraction F₁ à la cinquième (Figure 3-16), mais il est plus important quand le ratio fougou/malt est aussi grand. La plus grande teneur en fougou testée (ratio : 8/3,2) n'est pas encore saturante pour le déroulement du processus de fermentation alcoolique.

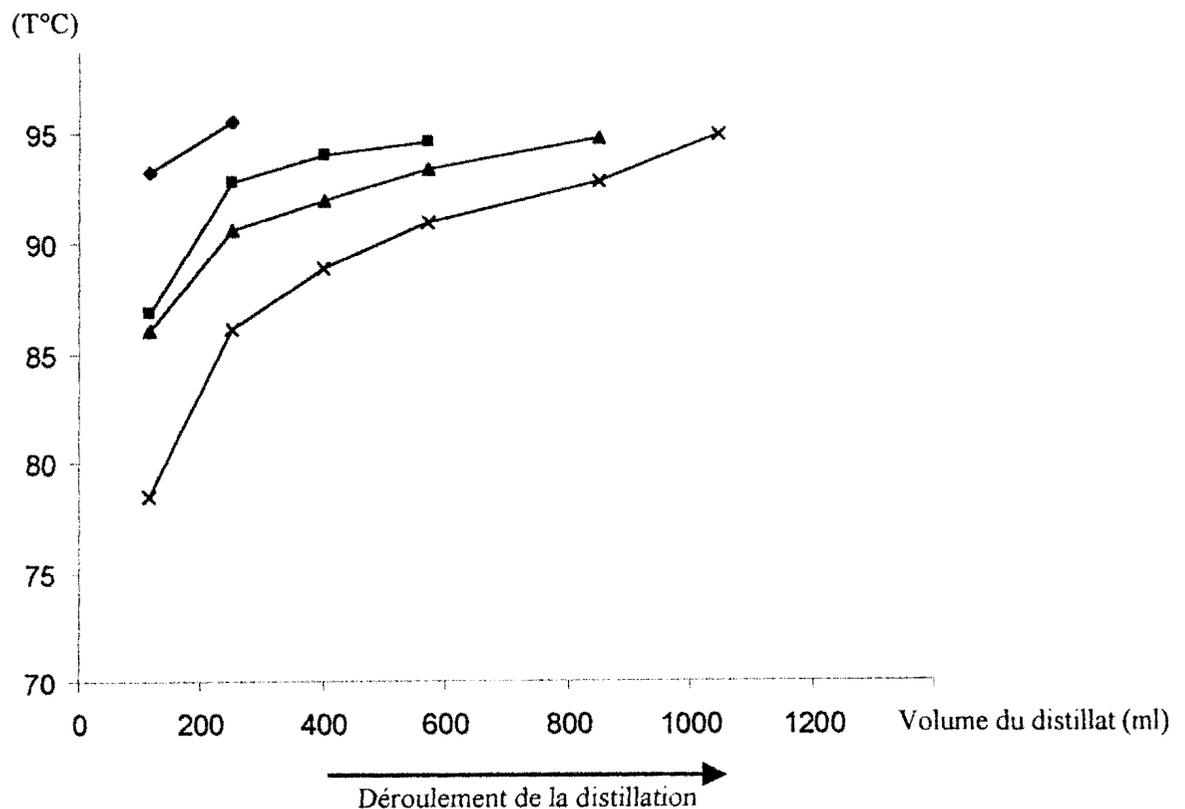


Figure 3-17 : Evolution de la température des moûts avec différents ratios fougou/malt

(Essai répétés 4 fois ; erreurs standard très faibles avec CV < 5%)

(◆) : Essai avec ratio 1/1 ; (■) : ratio 2,5/1 ; (▲) : ratio 5/2 ; (x) : ratio 8/3,2 ;

Pour chaque ratio, la température de collecte de fractions de distillat augmente de la première fraction à la cinquième (Figure 3.17). Elle est d'autant plus faible que le moût est plus dense ; avec le ratio *foufou/malt* de 8,32 la température est située entre 71°C et 78,5°C mais elle est de 91°C pour le ratio 1/1. Ainsi, au cours d'un cycle de distillation, à chaque titre alcoométrique d'une fraction de distillat correspond une gamme de températures plus ou moins étendue (Figures 3.16 et 3.17). Des fractions de distillat titrant 40°GL, 20 à 21°GL et 16 à 18°GL ont été recueillies respectivement à 90°C-92°C, 93-95°C et 95-96°C, en 5-8 minutes. Cela devrait permettre à l'opérateur de réguler le chauffage manuel lors du processus de distillation d'un moût fermenté.

2 - Evolution de la fermentation en fonction de la teneur en malt, suivant le ratio α -amylase/amidon (U/g).

La diminution de la densité du moût en fonction du temps suit une courbe hyperbolique. Après 72 heures, l'évolution est identique pour les ratios 123,71/1, 247,13/1 et 346,36/1. Elle marque la fin du processus de fermentation (Figure 3.18).

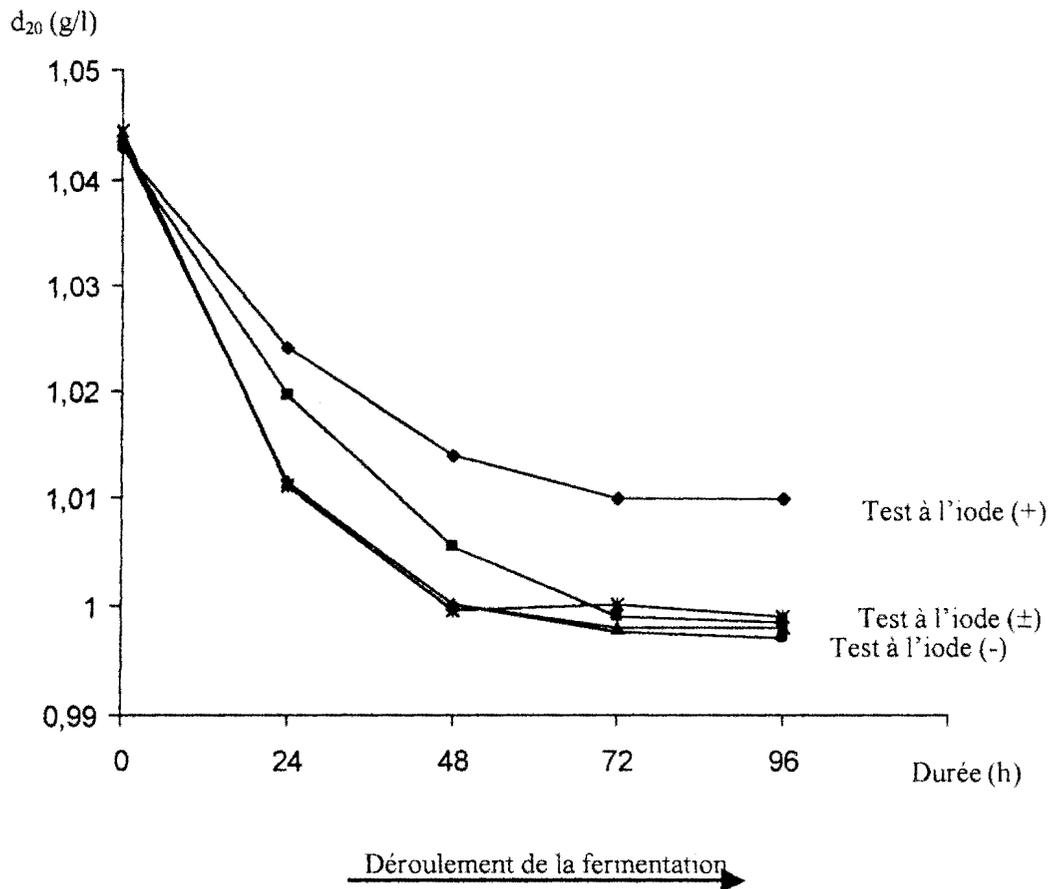


Figure 3-18 : Evolution de la densité du moût en fonction du versement du malt suivant le ratio α -amylase/amidon. (Essai en triple ; erreurs standard très faibles avec CV < 1%)

(◆) : densité du moût avec ratio = 15,45/1 ; (■) : densité du moût avec ratio 61,85/1 ;

(×) : densité du moût avec ratio 123,7/1 ; (▲) : densité du moût avec ratio 247,13/1 ;

(●) : densité du moût avec ratio 346,36/1.

La densité limite marque la fin du processus de fermentation. La saccharification est incomplète dans le moût fermenté avec des ratios α -amylase/amidon égaux ou inférieurs à 61,85/1 (U/g) . Par contre, elle est complète avec des ratios supérieurs. En effet, le test à l'iode sur le moût en fin de fermentation est positif pour le ratio 15,45/1, légèrement positif pour le ratio 61,85/1 et négatif pour les ratios égaux ou supérieurs à 123,7/1.

Par ailleurs, avec le ratio égal ou supérieur à 61,85/1, l'évolution des titres alcoométriques est identique, ce qui permet de conclure à un effet de saturation du malt de maïs (Figure 3.19) ; la vitesse maximale correspond au ratio 123,7/1 (U/g).

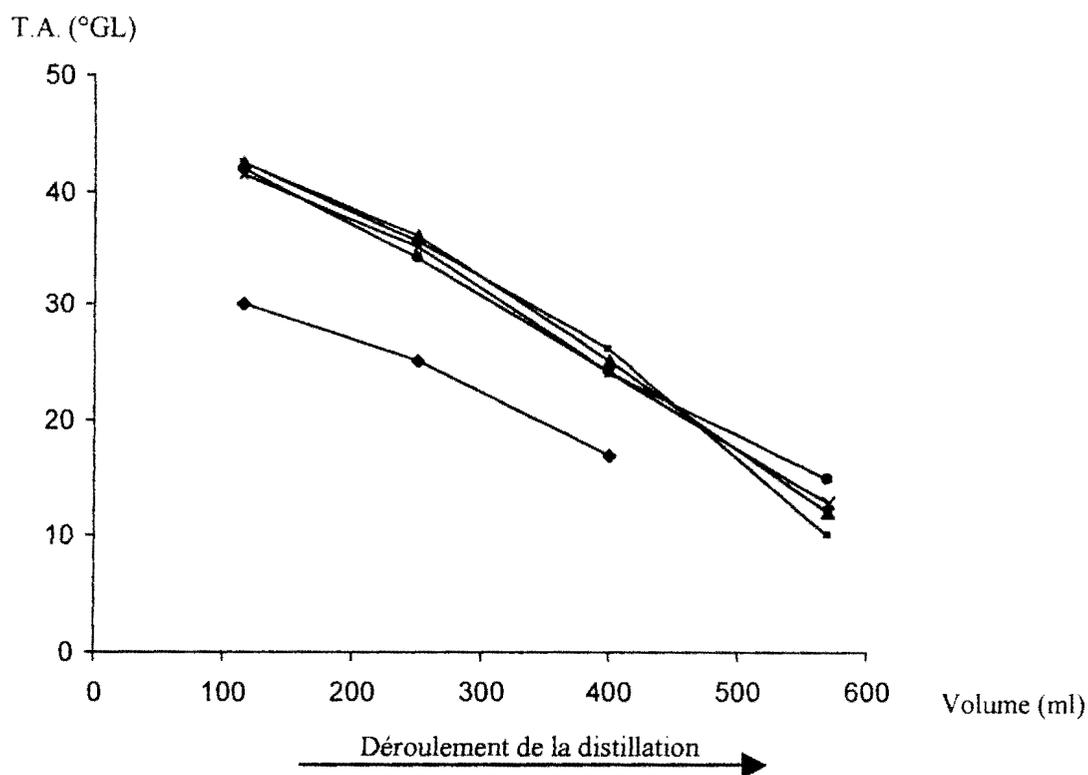


Figure 3.19 : Evolution du titre alcoométrique du distillat en fonction du versement du malt suivant le ratio α -amylase/amidon. (Essai en triple ; erreurs standard très faibles avec $CV < 5\%$) ;

TA : Titre alcoométrique en degrés Gay Lussac.

(◆) : ratio 15,45/1 ; (■) : ratio 61,85/1 ; (▲) : ratio 123,7/1 ;

(×) : ratio 247,13/1 ; (●) : ratio 346,36/1

3 - Importance du levurage du moût sur le déroulement de la fermentation

Le levurage du moût (89,02g d'amidon/l et 11.000U d' α -amylase/l) avec des concentrations cellulaires variables d'une souche commerciale de *Saccharomyces cerevisiae*, montre (Figure 3.20) que la fermentation est plus rapide et se termine plus tôt quand le taux de levurage augmente. La densité diminue et atteint sa valeur minimale à partir de 72 heures de fermentation pour le taux de levurage de 134×10^6 UFC/ml (0,996 g/ml de moût) et en 96 heures dans le cas du témoin sans levurage (1,001g/ml de moût).

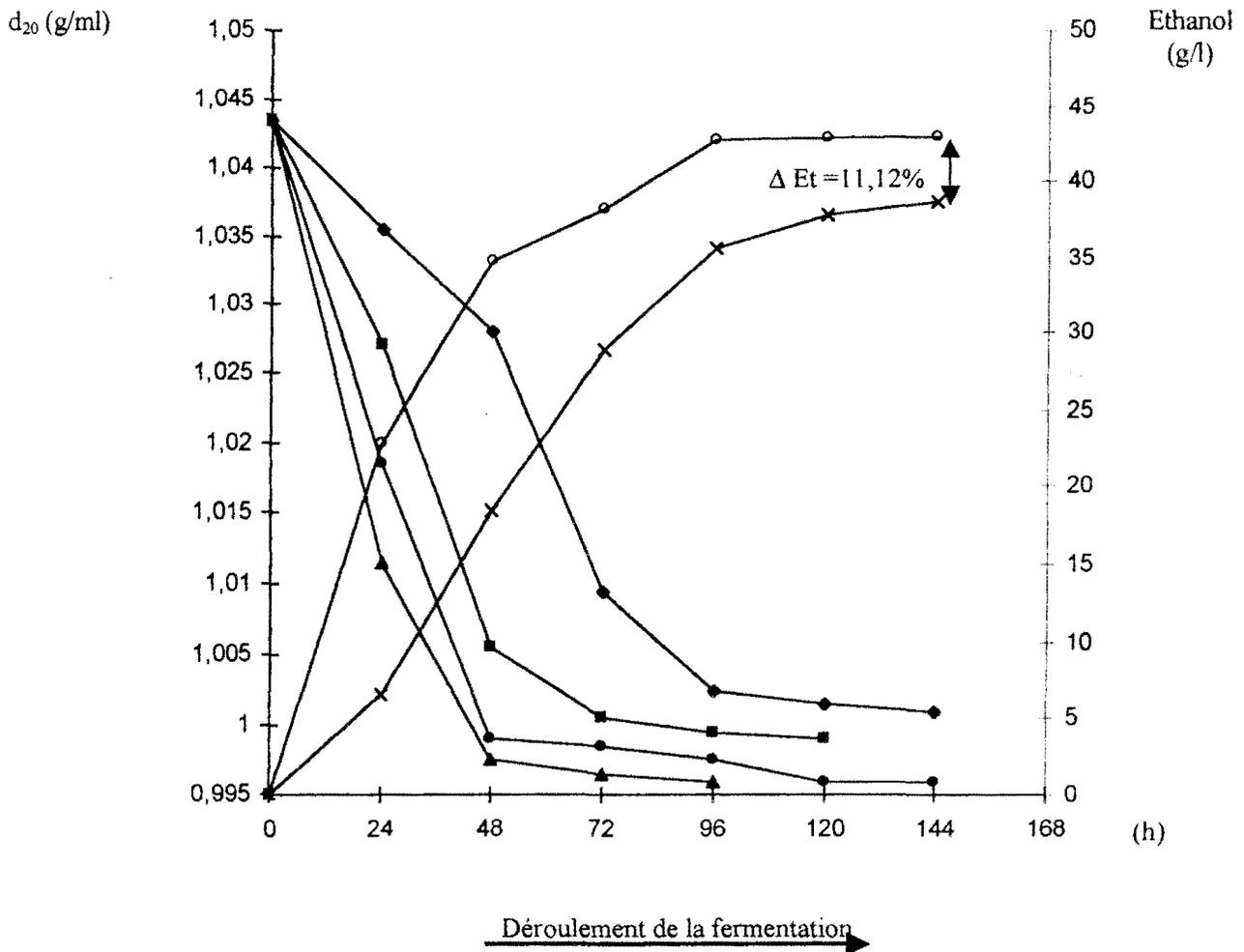


Figure 3-20 : Evolution de la densité et de la teneur en éthanol du moût en fermentation en fonction du levurage. (Essais en triple ; erreurs standard très faibles avec CV < 1% pour la densité et CV < 3% pour la teneur en éthanol ; teneur initiale en amidon : 89,02g/l et activité α -amylasique : 11.000U/l).

d_{20} : densité du moût à 20°C ; ΔEt : variation de la teneur en éthanol en %

(◆) : densité du moût de l'essai témoin sans levurage

(■) : densité du moût avec ensemencement de $16,81 \times 10^6$ UFC /ml ;

(●) : densité du moût avec ensemencement de $67,24 \times 10^6$ UFC /ml ;

(▲) : densité du moût avec ensemencement de $134,5 \times 10^6$ UFC /ml ;

(x) : teneur en éthanol de l'essai témoin sans levurage.

(○) : teneur en éthanol avec ensemencement de $67,24 \times 10^6$ UFC /ml ;

Le degré alcométrique est maximale lorsque la densité atteint sa valeur minimale (Figure 3.20) qui marque ainsi le terme du processus de fermentation : 42,97g d'éthanol formé par litre au bout de 96 heures pour le moût avec levurage contre 38,87g d'éthanol/l en 168 heures dans le cas de l'essai sans levurage. En effet, (Figure 3.20) La vitesse de fermentation alcoolique est plus importante (0,82g d'éthanol formé/l.h) pour le moût avec levurage ($67,24 \times 10^6$ UFC/ml) que dans le cas de la fermentation naturelle sans levurage (0,49g d'éthanol/l.h).

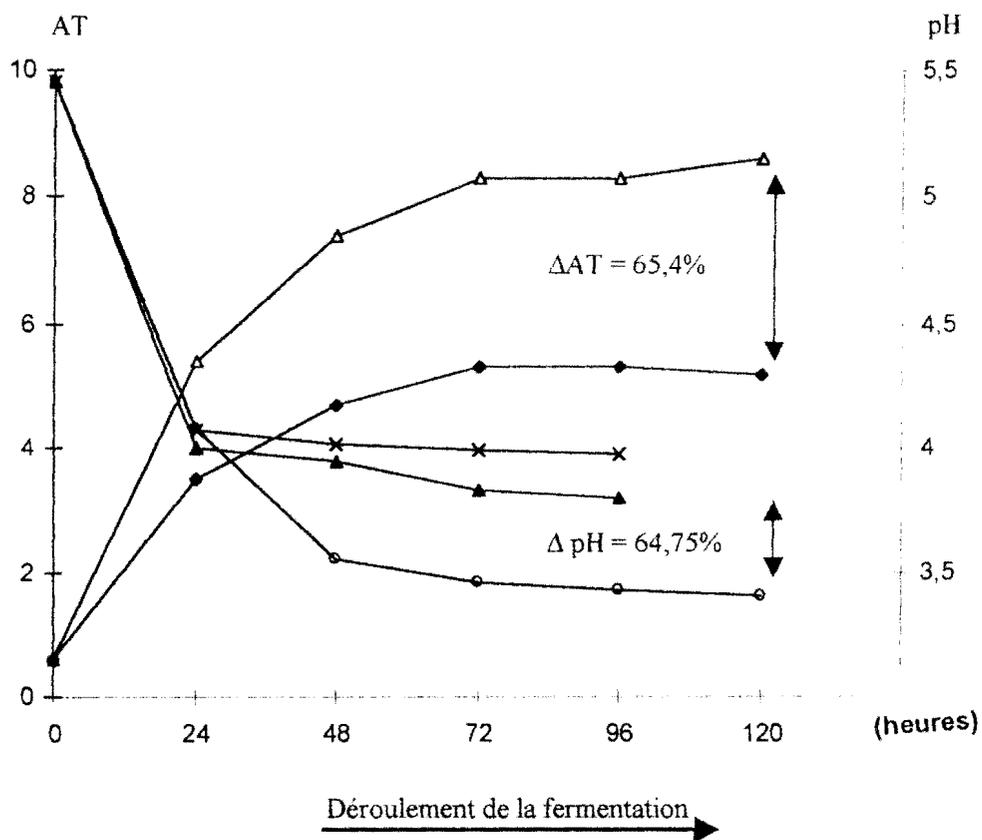


Figure 3.21: Evolution du pH et de l'acidité titrable du moût en fermentation en fonction du levurage. (Essais en triple ; erreurs standard très faibles avec CV < 1%)

AT : Acidité titrable en ml de NaOH 0,1N, ΔAT : variation d'acidité titrable ;

ΔpH : variation du pH

(Δ) : Acidité titrable sans levurage

(\blacklozenge) : Acidité titrable avec levurage par ensemencement de $67,24 \times 10^6$ UFC/ml

(\circ) : pH sans levurage.

(\blacktriangle) : pH avec levurage par ensemencement de $67,24 \times 10^6$ UFC/ml.

(\times) : pH avec levurage par ensemencement de $134,5 \times 10^6$ UFC/ml ;

L'évolution du pH et de l'acidité titrable pour différents taux de levurage montre que (Figure 3.21) le pH du moût contenant 89g d'amidon/l et 11.000U d' α -amylase/l (ratio α -amylasique/ amidon=123,7/1) diminue de 5,5 à 3,39 dans le cas de la fermentation spontanée et de 5,5 à 4 dans la fermentation avec levurage. L'acidité titrable, par contre, augmente et atteint des valeurs supérieures plus élevées pour le moût en fermentation spontanée qu'en fermentation avec levurage (Figure 3.22).

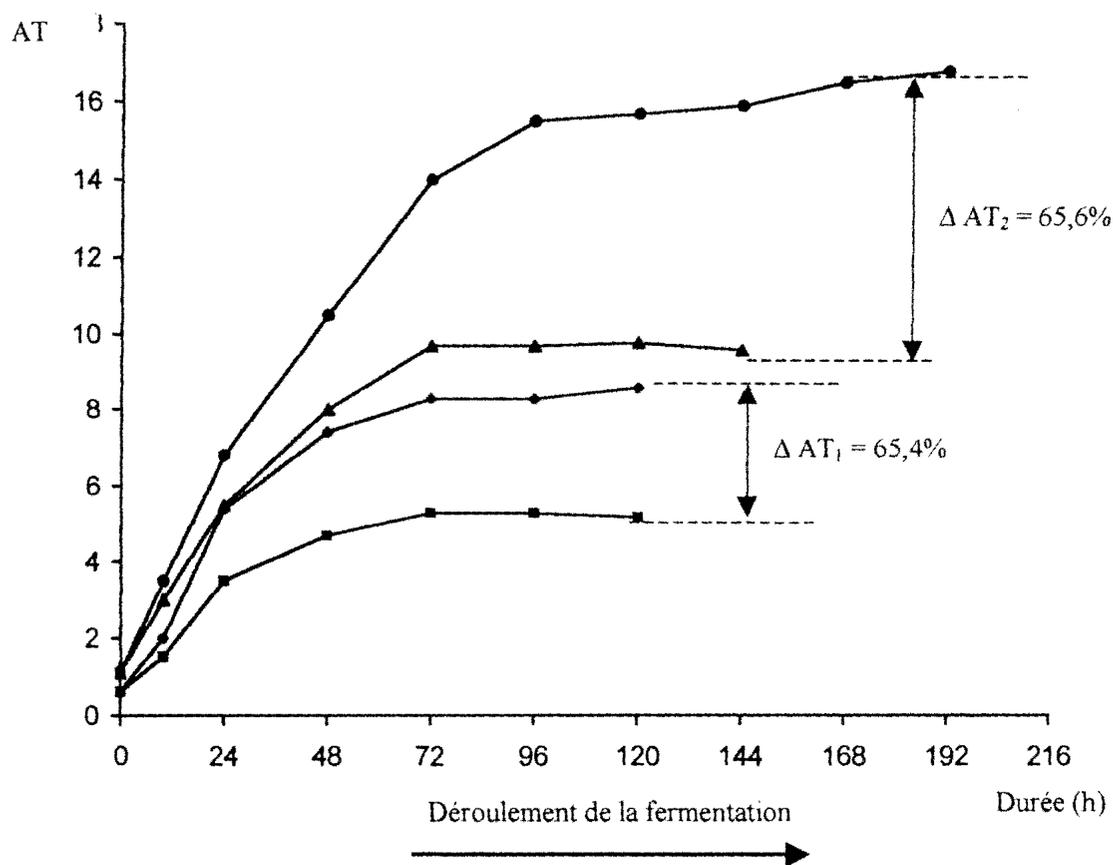


Figure 3.22 : Evolution de l'acidité titrable au cours de la fermentation des moûts formulés avec un ratio α -amylase/amidon = 123,7 (U/g).

(Essais en triple ; erreurs standard très faibles avec CV < 2%)

- AT : acidité titrable en ml de NaOH 0,1N ;
 (◆) : moût avec 89,02g d'amidon/litre, sans levurage ;
 (■) : moût avec 89,02g d'amidon/litre, avec levurage ;
 (●) : moût avec 285g d'amidon/litre, sans levurage ;
 (▲) : moût avec 285g d'amidon/litre, avec levurage

Avec des moûts ayant des teneurs en amidon de 89g/l et 285g/l (Figure 3.22), l'évolution de l'acidité titrable suit une courbe parabolique. Sa valeur finale est plus importante dans

le cas d'un moût sans levurage que dans celui avec levurage (avec une différence d'acidité titrable de 65 %).

4 - Effet du pied de cuve sur l'acidification au cours de la fermentation du moût

Au cours de la fermentation alcoolique en présence du pied de cuve (Figure 3.23), l'acidification est plus importante de 13,55% par rapport au témoin sans pied de cuve et sans levurage, et de 81,13% par rapport au moût sans pied de cuve mais avec levurage. Cette différence pourrait expliquer le refus de certains producteurs d'utiliser le pied de cuve séché qui entraîne une acidification intense du moût.

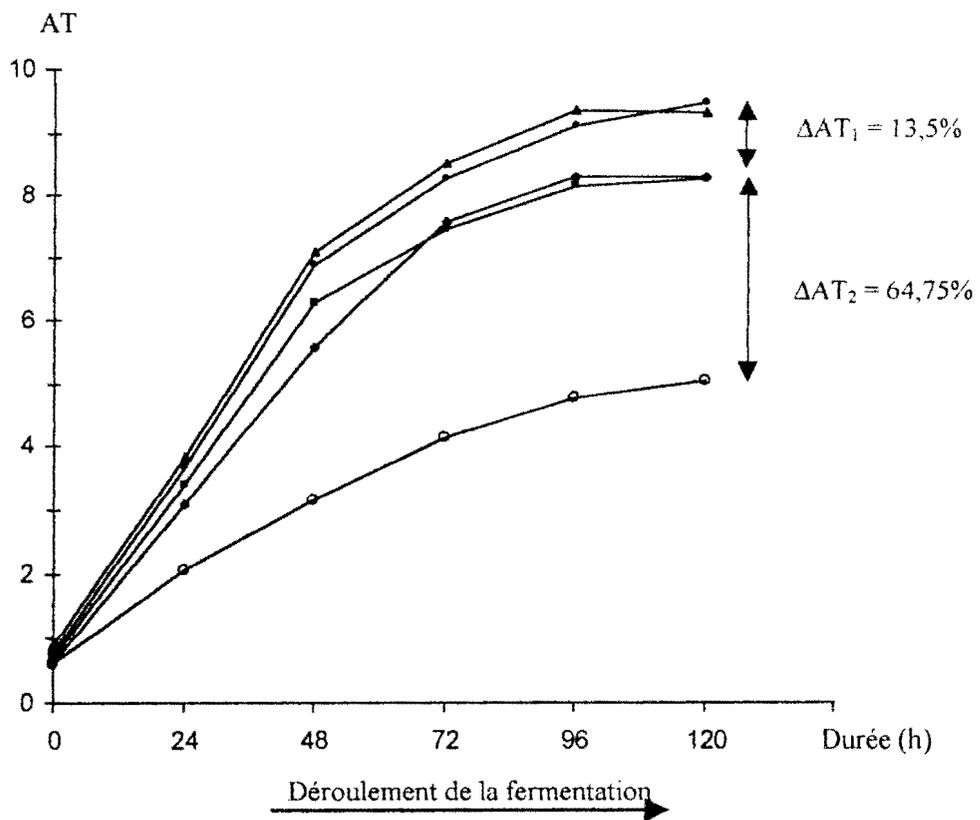


Figure 3.23: Evolution de l'acidité titrable au cours de la fermentation du moût en fonction de la teneur en pied de cuve (Essais en triple ; erreurs standard très faibles avec CV < 2%)

AT : Acidité titrable en ml de NaOH 0,1N.

(◆) : Essai témoin sans pied de cuve

(■) : Essai expérimental avec 5g/l de pied de cuve ;

(●) : Essai expérimental avec 10g/l de pied de cuve ;

(▲) : Essai expérimental avec 20g/l de pied de cuve.

(○) : Essai expérimental avec levurage et sans pied de cuve.

5 - Transformation de l'amidon au cours de la fermentation du moût de *boganda*.

La transformation de l'amidon a été examinée suivant différentes conditions opératoires : avec ou sans levurage et suivant les ratios α -amylase/amidon du moût de 15,45/1 et 123,7/1 (U/g) (Tableau 3.20).

Les rendements de la transformation de l'amidon indiquent que (Tableau 3.20), la consommation de l'amidon est plus importante dans le cas des moûts avec levurage que dans les moûts sans levurage. Le rendement de la conversion de l'amidon en éthanol est cependant relativement le même, entre 55 et 59 %, en cas du levurage ou non du moût. Pour le moût contenant 89g d'amidon/l, 56% d'amidon ont été convertis en éthanol dans le cas du moût avec levurage.

Tableau 3-20 : Bilan de la transformation d'amidon, de sa conversion en éthanol et de l'évolution du pH au cours de la fermentation du moût de *boganda*.
Condition : taux de levurage $67,25 \times 10^6$ UFC/ml de moût.

Paramètres de fermentation	Ratio α -amylase/amidon : 15,45/1 (U/g)		Ratio α -amylase/amidon : 123,7/1 (U/g)	
	Témoin (sans levurage)	Essai (avec levurage)	Témoin (sans levurage)	Essai (avec levurage)
[amidon] _i (g/l)	70,35	70,35	89,02	89,02
[amidon] _r (g/l)	23,6	11,6	5,05	2,04
[amidon] _t (g/l)	46,75	58,75	74,97	77,98
[éthanol] _f (g/l)	26,5	34,57	39,75	43,80
pH _i	5,45	5,45	5,40	5,40
pH _f	3,27	3,45	3,32	3,89
Rendement de transformation d'amidon (%)	73,5	86,97	92,82	97
Rendement de conversion d'amidon en éthanol (%)	55,68	58,84	53,02	56,168

- valeurs moyennes des essais répétés 4 fois ; (erreurs standard faibles, avec CV<1%) ;
- pH_i = pH initial ; pH_f = pH final ; [amidon]_i = teneur en amidon initiale ;
- [amidon]_t = teneur en amidon transformé ; [amidon]_r = teneur en amidon résiduel ;
- [éthanol]_f = teneur en éthanol finale.

6 - Effet du levurage sur l'acidité volatile et la productivité de la fermentation éthanolique

L'acidité titrable est plus élevée dans le cas de la fermentation spontanée que dans celui de la fermentation du moût avec levurage (Tableau 3-21). L'acidité volatile est, par contre, plus faible dans le cas des moûts denses avec levurage : l'acidité volatile de 0,1676g d'acide acétique par litre pour le moût avec levurage contenant 285g d'amidon par litre, et 0,27g d'acide acétique par litre de moût sans levurage contenant 89g d'amidon par litre. Mais, à l'inverse, la productivité globale est nettement plus élevée pour les moûts denses avec levurage (Tableau 3.21).

Tableau 3-21 : Influence du levurage du moût sur l'acidité volatile en fin de fermentation du moût et productivité maximale d'éthanol pour des teneurs en amidon qui encadrent ceux en milieu réel.

Paramètres	Teneur en amidon : 89,02g/l		Teneur en amidon : 285g/l	
	Sans levurage	Avec levurage ($67,24 \times 10^6$ UFC/ml)	Sans levurage	Avec levurage ($134,5 \times 10^6$ UFC/ml)
Durée de fermentation (h)	96	72	168	96
Acidité titrable (ml de NaOH 0,1N)	8,15	5,3	16,63	9,65
Acidité volatile (g d'acide acétique/l)	0,27	0,258	0,175	0,1676
Ethanol (g/l)	35	44	112	117
Productivité horaire maximale (g d'éthanol/l.h)	0,36	0,61	0,66	1,22
Ratio éthanol/ acidité volatile	129,62/1	170,54/1	640/1	698,1/1

Valeurs moyennes des essais en triple.

La productivité maximale horaire est de 1,22g d'éthanol formé par litre de moût et par heure dans le cas du moût à 285g d'amidon par litre et avec levurage contre 0,61g

d'éthanol par litre et par heure pour le moût à 89g d'amidon par litre avec levurage et 0,36g d'éthanol par litre et heure pour ce même moût mais sans levurage. Le ratio éthanol/acidité volatile augmente avec le levurage et la densité du moût (Tableau 3.21).

Le levurage favorise la formation d'éthanol au détriment de l'acidité volatile (ratio éthanol / acidité volatile = 129/1 pour le cas sans levurage et 170,54/1 avec levurage) par rapport à la fermentation sans levurage.

7- Importance du levurage sur la composition du *boganda* en substances organiques volatiles

Le *boganda* obtenu (Tableau 3-22) selon la méthode par levurage du moût contient moins d'acide acétique (ratio sans levurage / avec levurage = 4,17/1) et d'acide propionique (ratio = 3,17/1), beaucoup plus d'acide butyrique (ratio = 0,06/1) et beaucoup moins de 4-méthylpentanol (ratio = 6,47/1) par rapport au moût sans levurage. Cela confirme bien les résultats précédents indiquant que le levurage du moût conduit à une eau-de-vie (le *boganda*) moins acide.

Tableau 3.22 : Ratios des valeurs des substances volatiles de *boganda* obtenu selon deux méthodes de fermentation (avec ou sans levurage)

Substances volatiles	Ratio A/B
Acide acétique	4,17/1
Alcool isoamylique	0,775/1
Acide propanoïque	3,17/1
2-Méthylbutanol	0,362/1
Acide butyrique	0,06/1
4- Méthylpentanol	6,47/1

A = valeurs des substances obtenues sans levurage ;

B = valeurs des substances obtenues avec levurage.

Tableau 3.23 : Composition en substances organiques volatiles des fractions de distillat provenant d'un moût fermenté avec levurage.

Substances volatiles	Fractions de distillation du <i>boganda</i>			
	F1	F2	F3	F4
Ethanol (%)	97,843	98,153	98,336	98,904
Acide acétique (%)	0,082	0,085	0,075	0,063
Alcool isoamylique (%)	0,005	0,016	-	0,004
Acide propanoïque (%)	0,045	0,026	-	-
Acide butyrique (%)	0,473	0,446	0,424	0,273
Hexanol (%)	0,001	0,001	-	0,003
Phényléthanol (%)	-	-	-	0,007
Décanoate d'éthyle (%)	0,011	0,008	-	0,011
Hexadécanoate d'éthyle (%)	0,091	0,017	-	0,002

F1, F2, F3 et F4 : première, deuxième, troisième et quatrième fractions de distillat.

Quelque soit la fraction de distillat recueilli (Tableau 3.23), l'éthanol demeure le métabolite volatil largement dominant (97,843 – 98,904% des substances organiques volatiles) ; cela confirme bien que la fermentation dans la fabrication du *boganda* est une fermentation éthylique.

Apparaissant dans la première fraction avec une valeur relativement basse (0,082% des métabolites), l'acide acétique est plus représenté dans la deuxième fraction du distillat (0,085%) et décroît progressivement dans les fractions suivantes (0,063% dans la quatrième fraction) (Tableau 3.23). Le 2- méthylbutanol, le pentanol, l'acide butyrique, le 4-méthylpentanol et l'hexadécanoate d'éthyle apparaissent plus dans la première fraction et diminuent progressivement jusqu'à la quatrième fraction (Figure 3.24). Cela explique le choix des trois premières fractions par les producteurs traditionnels pour le coupage dans la formulation du *boganda*. Les autres composés sont plus ou moins régulièrement présents dans toutes les fractions (Tableau 3.23).

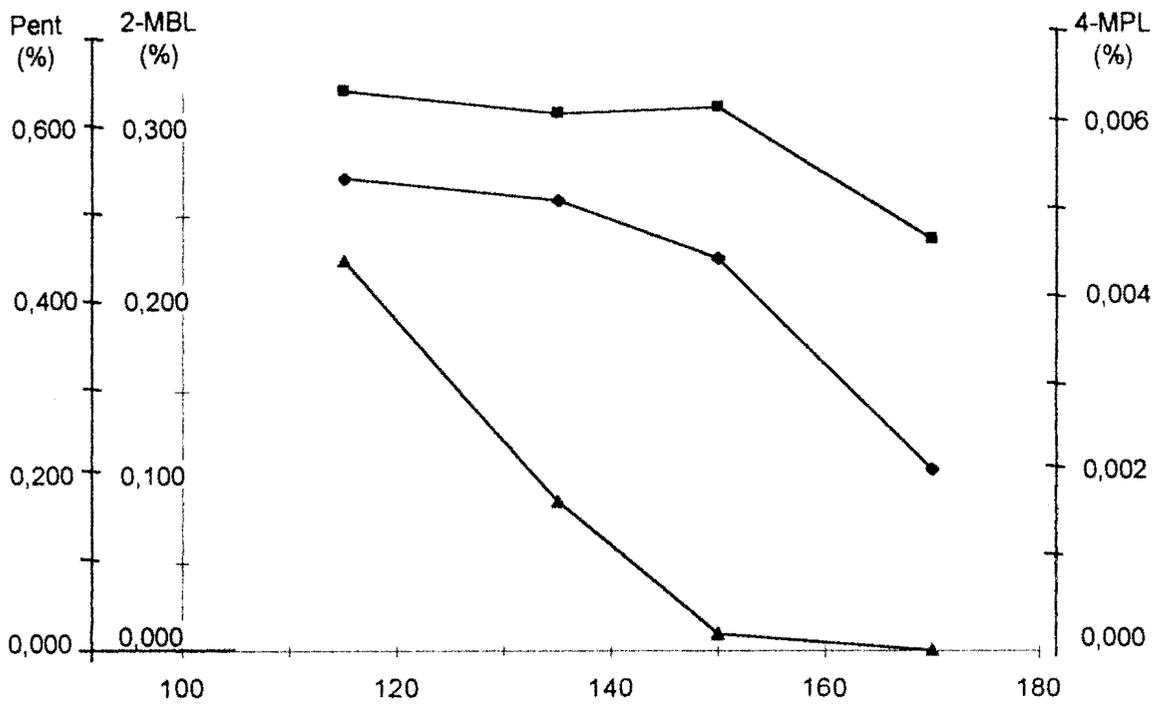


Figure 3.24 : Apparition des alcools supérieurs dans le distillat au cours du processus de distillation
 (■) Pent : pentanol
 (◆) 2-MBL : 2-méthylbutanol
 (▲) 4-MPL : 4-méthylpentanol

Chapitre 4 : Discussions

Les résultats d'enquête menée auprès de 71 opérateurs au niveau de 27 ateliers révèlent une grande diversité du procédé de production de *boganda*.

Dans la production de *boganda*, marquée par une grande diversité de procédés, le maltage du maïs et la fermentation sont des étapes comparables à celles intervenant dans les productions du malt d'orge et de la bière (Figures 3.1 et 3.2). Une augmentation significative du rendement et l'amélioration de la qualité de l'alcool produit en appliquant des règles de production plus rigoureuses sont possibles.

Le maltage du maïs, première étape du procédé, est conduit de façon très irrégulière à cause à la fois de la qualité du maïs utilisé ainsi que du manque de connaissances des producteurs. En effet, le maltage effectué par les artisans se caractérise par un taux de germination très irrégulier au bout de 5 jours.

Lors de la phase d'étouffement, qui permet de potentialiser les activités enzymatiques du malt de maïs nécessaires à la saccharification de la bouillie de fufou et à la fermentation alcoolique, le grain devient fiévreux et subit une désagrégation tissulaire poussée visualisée par un ramollissement avancé des grains. Le maintien de la température à 43-50°C pendant plusieurs jours au cours de cette phase devrait favoriser la protéolyse enzymatique mais inhiber l'activité α -glucosidasique du malt [18 ; 61] pouvant permettre la libération du glucose dans le moût de *boganda* à partir du maltose et du maltotriose [18 ; 19 ; 31].

La deuxième étape, plus complexe, semble avoir une action double : la saccharification entraînant la diminution de la densité du moût et la formation d'éthanol et de CO₂.

La variabilité dans les procédés, la composition du milieu de fermentation, le volume du moût (CV = 15%), la qualité des matières premières et la température expliquent la variabilité constatée dans la production de *boganda* (CV= 52,72%).

L'éthanol est le principal métabolite formé (95,16%des métabolites) au cours de la fermentation du moût de *boganda*. Les autres métabolites, notamment les alcools amyliques, le phényléthanol et les esters d'éthyle, apparaissent en quantités mineures. [18 ;19;31 ;36 ;37 ;40 ;42 ;43 ;56 ;58] (Tableau 3.8 et Figure 3.5). Le phényléthanol, dont la teneur augmente avec celle d'éthanol, proviendrait de la dégradation de la phénylalanine suivant le mécanisme d'Ehrlich, [18 ; 36 ; 77]. A l'exception de la production régulière de l'éthanol (CV = 4,58%), les autres métabolites sont produits de façon très irrégulière (CV compris entre 33,33 et 149,3%).

L'acidité volatile du *boganda* est représentée par l'acide acétique (3,35 % des métabolites) (Figure 3.5) comme c'est le cas en brasserie [18 ;61].

Le faible rendement du procédé est dû à une saccharification incomplète, mise en évidence par le test à l'iode positif [18 ; 35 ;61 ;66] sur le surnageant et le dépôt du moût fermenté. La présence d'un important dépôt pâteux (41,8% du volume total) gêne l'agitation du milieu nécessaire à la bonne réalisation de la fermentation [18 ; 36 ;74 ;78 ;79] qui est très longue comparée à celle d'autres produits comme le *Kachasu* [80 ; 81 ; 82]. L'utilisation de la vinasse à 82°C pour l'empesage de *foufou* qui est assez constante (CV= 3,29%) permet une économie d'énergie et la récupération d'amidon et d'éthanol résiduel par recyclage.

Au cours du processus de distillation (Figures 3.1 et 3.2), la récupération progressive des différentes fractions du distillat en fonction de la dose d'alcool par l'opérateur se fait suivant des paliers de température bien caractérisés de 94°C à 98°C. Chaque palier de température correspond à un volume de fraction de distillat ayant une dose donnée d'alcool. Le volume de distillat recueilli est d'autant plus important que la fermentation a été efficacement menée.

Cette distillation bien que fastidieuse permet de séparer les produits volatils (esters , alcool éthylique, alcools supérieurs et acides organiques dont l'acide acétique) de l'extrait sec. Le degré alcoolique qui est de 22,5°GL varie comme pour la plupart des alcools de bouche produits artisanalement : *Kachasu* (9 - 41%) et *Waragi* [80 ; 81 ; 82].

Le caractère trouble du *boganda*, en moyenne 2,5 unités EBC [67] est dû à l'utilisation d'un distillateur très rudimentaire (Figure 2.2). En effet, le distillat est recueilli à partir d'un condensateur directement relié à la chaudière, comparativement au distillateur Adam de 1801 (Figure 1.8) déjà plus évolué.

Malgré la variabilité des conditions de production et le caractère très dispersé, le *boganda* présente un niveau d'acceptabilité sensorielle satisfaisant (cotation globale = 60,6/100) de manière assez régulière (CV= 8,3 - 13,44%).

Le taux d'humidité est relativement plus important lorsque le maïs provient d'un court stockage; inversement, il est moins élevé en cas de long stockage de maïs. Il y aurait

déshydratation au cours du stockage. La masse de 1.000 grains permet de préciser la quantité de grains sains et conformes dans un stock donné de masse connue [61]. Cette mesure a montré une grande variation sur l'uniformité de la taille des grains de maïs des différents stocks de commerce. 1.000 grains de grande taille pèsent plus que les grains de petite taille, par exemple 345g pour 1.000 grains de la variété Sibiti contre 272g pour 1.000 grains de la variété Accross. Le contrôle de qualité au cours de l'entreposage du maïs en milieu traditionnel présente un grand intérêt pour le stock de maïs d'une variété donnée [2 ;18 ;34 ; 61], la quantité de déchets et impuretés est plus importante avec un stock plus ancien (jusqu'à 48% d'impuretés pour un stock de 8 mois).

Au cours de l'étape de trempage de grains de maïs à 30-34°C, les résultats montrent que les grains de maïs absorbent l'eau en trois phases, notamment une phase initiale d'hydratation rapide (91,7mg d'eau/g de grain/ heure) suivie d'une phase de ralentissement et d'une phase finale plus lente et discrète (2,5mg d'eau/g de grain /heure).

Par ailleurs, au cours du trempage du maïs, intervient le phénomène d'acidification d'origine microbienne de la trempage comme l'ont montré Louembé et al. [6] et Akinrele [83]. Cette acidification de la trempage est relativement plus importante dans le cas du trempage unique que lors du trempage séquentiel où les divers changements d'eau de trempage opérés éliminent en partie l'acidité formée [18 ;61] et la flore microbienne.

Le processus de germination est influencé par le mode de trempage et l'état du grain de maïs. Le démarrage de la germination est plus rapide en cas du trempage séquentiel et de grains de maïs provenant d'un stockage court. Le taux de germination est plus élevé lors du trempage séquentiel que dans le cas du trempage unique : 89% de grains germés au bout de 96 heures pour la variété Accross de 3 mois lors du trempage séquentiel contre 83,28% de grains germés au bout de 96 heures de germination pendant le trempage unique.

La germination arrive à son terme lorsque la racicule atteint une longueur entre 30 mm et 60 mm environ. Elle correspond à un taux maximal de grains germés pour une durée donnée de germination (9% de grains germés au bout de 96 heures pour un stock de 8 mois de la variété Moudikoula 1 et 83% au bout de 48 heures pour un stock plus récent

de 3 mois de la variété Accross). Enfin, le trempage séquentiel semble être plus favorable au développement de l'activité α -amylasique (217U/gMS à 48 heures de germination pour la variété Accross de 3 mois) par rapport au trempage unique (158U/gMS).

Au cours du processus d'étouffement, les élévations de la température au niveau de la couche de malt vert seraient dues au développement des activités biologiques [9], notamment l'activité α -amylasique [31], liées à la croissance d'une microflore complexe constituée principalement des levures, des moisissures et des bactéries, responsables de la fermentation spontanée et recherchées par les producteurs traditionnels du *boganda*.

L'activité α -amylasique des grains augmente au cours des différentes étapes, du trempage à l'étouffement. Il y a bien potentialisation des activités amylolytiques au cours du processus d'étouffement de la germination [18].

Cependant cette phase, se déroulant dans des conditions devenant progressivement anaérobies [9], est plus longue que dans le cas du maltage d'orge.

Dans la formulation du moût de *boganda*, le versement de divers ingrédients joue un rôle important sur l'efficacité de la fermentation alcoolique [18]. Lorsque la teneur en amidon augmente, la vitesse de la fermentation décroît et la durée augmente. Cependant, le nombre de fractions de distillat recueilli ayant un titre alcoométrique supérieur à 20°GL est plus grand pour une plus forte teneur en *foufou* (5 fractions pour un moût de ratio foufou/malt de 8/3,2 par rapport à 2 fractions de distillat pour un moût de ratio 2/1).

De plus, la première fraction du distillat obtenue par distillation d'un moût dense présente un titre alcoométrique plus élevé (65°GL pour la première fraction à partir d'un moût de ratio foufou/malt de 8/3,2 contre 34°GL dans le cas du ratio 2/1).

La fermentation est plus efficace avec une teneur en amidon plus importante. Cependant, la plus forte teneur en amidon testée (285 g/l) ne semble pas encore être saturante pour la fermentation alcoolique [62] alors que l'activité de l' α -amylase du moût est déjà maximale (ratio α -amylase/amidon : 123,7/1) dans les conditions des essais.

En effet, le déroulement de la fermentation du moût de *boganda* peut être suivi en mesurant la densité [18 ;38 ;61] pour des teneurs en amidon inférieures à 114g/l ; au-delà de cette concentration, le moût devient de plus en plus pâteux. Le levurage du moût accélère la vitesse de la fermentation : 0,96g d'éthanol/l.h dans le cas du moût avec levurage et 0,42g d'éthanol/l.h pour le moût sans levurage [5 ;38 ;42 ;61].

L'utilisation du pied de cuve dans la formulation du moût de *boganda* conduit à une augmentation de son acidité au cours de la fermentation, probablement par l'apport d'une flore à activité acidifiante [61].

Le levurage améliore la productivité globale, diminue la formation d'acidité volatile de 65 % ; il conduit à un meilleur contrôle du processus fermentaire en permettant à la levure d'ensemencement de prendre le dessus sur les autres membres de la flore microbienne [18 ;37 ;41 ;42].

L'amylolyse semble être un facteur limitant de la fermentation, mais elle est activée par le versement du malt de maïs [1 ;8 ;18 ;60 ;61] dont l'optimum est obtenu avec le ratio α -amylase/amidon de 61,85/1 (U/g) et le levurage du moût. Cela entraîne ainsi une amélioration dans la transformation de l'amidon en éthanol.

Concernant la distillation des moûts fermentés, les fractions de distillat sont recueillies suivant des paliers de température plus ou moins variables. Les paliers les plus bas correspondent aux fractions les plus alcoolisées (premières fractions titrant 66°GL et récoltées à $86,82^{\circ}\text{C} \pm 5,3^{\circ}\text{C}$). Il existe alors une relation entre titre alcoométrique du moût fermenté et palier de température de distillation traditionnelle [38].

Dans le *boganda*, l'éthanol est le métabolite dominant (98 % environ des métabolites). Cela indique que le processus de production du *boganda* est une fermentation alcoolique comme c'est le cas dans la fabrication de la bière [1 ;18 ;19 ;31 ;36 ;37 ;61 ;65 ;81 ;82] et du vin [37 ;38 ;40 ;42 ;56 ;57 ;58].

Conclusions et perspectives

Le *boganda* est une boisson alcoolisée produite au Congo-Brazzaville de façon artisanale et semi-industrielle en atelier.

Le procédé de production s'apparente à la production de malt et de bière mais les paramètres de production sont peu contrôlés et sont responsables de grandes différences sur les caractéristiques et la qualité du *boganda* obtenu.

Les résultats du test de dégustation indiquent que le *boganda* est un alcool de bouche dont le niveau d'acceptabilité est satisfaisant. Il est caractérisé par la présence des métabolites volatils provenant des diverses transformations biologiques (maltage et fermentation). Parmi ces métabolites figurent l'éthanol (environ 95% de substances volatiles détectées), l'acide acétique (environ 3,35%) et les composés en quantités mineures lesquels composés interviennent efficacement dans la qualité sensorielle de l'eau-de-vie : alcools amyliques (de 0,047% à 0,336%) et des esters dont les esters d'éthyle (de 0,01% à 0,015%). Les métabolites secondaires sont d'une très grande variabilité quantitative relevant d'une très grande dispersion opératoire ; la formation de phényléthanol augmente avec la teneur en éthanol selon le mécanisme d'Ehrlich.

Notre étude a permis de saisir les conditions permettant la maîtrise du processus de maltage de maïs conduisant au malt d'une certaine qualité nécessaire à la fermentation alcoolique en vue de la production d'une eau-de-vie et d'alcool à usage industriel et médical, et également de la fabrication de la farine de malt à activité α -amylasique en boulangerie.

Le procédé traditionnel de maltage de maïs comporte trois principales étapes : le trempage, la germination et le séchage. Une étape supplémentaire se déroulant dans des conditions d'anaérobiose et à une température rendant le grain fiévreux (43°C-50°C), a été observée pendant 5 à 10 jours à l'issue de la germination.

La présence de nombreuses impuretés et une irrégularité de la taille des grains (masse de 1.000 grains : entre 272g et 345g) devraient expliquer en partie l'irrégularité du produit de transformation constatée d'après les résultats de nos enquêtes.

Lors du trempage de maïs, l'humidification des grains suit une cinétique d'absorption d'eau présentant trois phases : une première phase accélérée les deux premières heures, une phase de ralentissement (de la 4^{ème} à la 21^{ème} heures) et une phase de

saturation d'eau à partir de la 21^{ème} heure en fonction de l'état physiologique du grain lié à la durée et aux conditions de stockage. Grâce à l'acidification de la trempe avec la diminution du pH, il s'opère au sein de la microflore une sélection qui améliore la qualité hygiénique du produit au cours du trempage.

Le trempage séquentiel est mieux indiqué que le trempage unique pour la bonne conduite de la germination avec un taux de germination plus élevé et une durée plus courte.

Quant au processus de germination, il semble également évoluer suivant une cinétique à trois phases : une première phase rapide correspondant à l'apparition des deux organes de croissance (radicule puis plantule) les 24 à 48 premières heures, une deuxième phase correspondant à la germination des derniers grains (entre la 36^{ème} et 72^{ème} heures), et une troisième phase limite d'apparition d'organes de croissance (radicule, plantule et radicelles). Cette dernière phase est fonction de l'historique du grain et indique la fin du processus de germination (entre la 48^{ème} et 120^{ème} heures).

D'après nos résultats , le terme de la germination devrait être apprécié lorsque la longueur de la radicule a atteint 30 à 60 mm afin d'éviter la formation d'arômes indésirables dus au développement excessif des organes de croissance du maïs . C'est dans ce contexte que la phase d'étouffement devrait intervenir pour freiner la germination en tuant le germe tout en favorisant la potentialisation des activités amylolytiques et fermentaires du malt de maïs traditionnel.

Les résultats de l'épreuve à l'eau des grains de malt obtenus après la phase d'étouffement (dans des conditions devenant progressivement anaérobies et chaudes jusqu'à 50°C) nous ont indiqué une désagrégation des tissus visualisée par un nombre de grains de malt plongeurs inférieur à 30% : nous avons atteint jusqu'à 13% de grains plongeurs suivant le trempage unique et 21% pour le trempage séquentiel après 144 heures d'étouffement.

Les résultats du dosage de l'activité α -amylasique, un élément recherché pour la qualité du malt, nous ont montré que cette enzyme a été présente au cours du trempage mais en quantité relativement faible (26U/gMS en fin de trempage de 28 heures), elle a augmenté au cours de la germination (217U/ g MS selon le trempage séquentiel et 158 U/ g MS pour le trempage unique à 48 heures de germination), ensuite au cours de

l'étouffement des grains germés (240U/ g MS pour le trempage séquentiel et 258U/ g MS suivant le trempage unique en 144 heures d'étouffement). Ce qui nous permet d'affirmer que l'étape d'étouffement de la germination aurait pour but la potentialisation de l'activité α -amylasique du malt de maïs très importante pour la phase de fermentation.

Le processus dure plus longtemps et le nombre de fractions de distillat, titrant plus de 20°GL, augmente lorsque la teneur du fufou augmente. La fermentation serait plus efficace en cas d'augmentation de la teneur en fufou.

La teneur du malt de maïs est capitale sur le déroulement de la fermentation du moût en raison du rôle de l'amylolyse enzymatique et de l'activité fermentaire dans la formation de l'éthanol, lorsque le malt utilisé avec du fufou donnent un moût de ratio α -amylase/amidon supérieur à 65,85/1 (U/g).

Le levurage du moût de *boganda* améliore le déroulement de la fermentation alcoolique : il raccourcit sa durée et augmente la productivité maximale horaire d'éthanol par rapport à la fermentation réalisée avec la flore indigène.

Par ailleurs, l'utilisation de pied de cuve conduit à une acidité élevée et explique pour certains producteurs traditionnels la dépréciation sensorielle du produit.

L'importance du levurage du moût traditionnel de *boganda* dans la conduite de la fermentation et l'étude microbiologique des souches de microorganismes alcoogènes, particulièrement les souches de *Saccharomyces sp.*, s'avère nécessaire en vue de la mise au point d'un stater adéquat pour la fabrication du *boganda*.

Pour améliorer le rendement de production et la qualité sensorielle du *boganda*, un certain nombre de facteurs a été exploré. Le trempage séquentiel a permis de réduire la durée du maltage. L'étape d'étouffement s'avère nécessaire pour un beau maltage, car il contribue à l'enrichissement du malt en activité α -amylasique qui est l'élément recherché dans le malt. Le levurage du moût a permis l'amélioration du rendement de la saccharification et celui de la fermentation. Il a aussi permis la réduction de la teneur en alcools supérieurs (alcool isoamylique, 4-méthylpentanol, hexanol et phényléthanol) et l'augmentation de la teneur en éthanol.

La qualité sensorielle est améliorée en utilisant un malt provenant d'une germination de durée limitée (48 heures) afin d'éviter la formation des arômes et goûts indésirables.

Dans le cadre de l'optimisation de ce procédé une attention devrait être apportée sur les points suivants :

1. une meilleure régulation de la phase de maltage afin d'obtenir une matière première plus homogène, ce qui devrait favoriser l'empâtage et le brassage ;
2. une reconsidération de l'opération appelée « distillation » car il apparaît clairement que les paramètres de température et la composition des fractions alcooliques ne répondent aux résultats d'une vraie distillation. Pour cette raison, il est important de requalifier cette phase en pré-distillation et de soumettre la fraction obtenue à une vraie distillation dans un équipement muni d'une colonne de Vigreux et d'un système de chauffage permettant une bonne séparation des différentes fractions ;
3. une identification d'autres substances volatiles (méthanol, alcools supérieurs, esters, aldéhydes, acides organiques, acétals ...) ;
4. une sélection et une caractérisation des principaux micro-organismes intervenant dans le processus de fabrication de *boganda* ;
5. une mise au point des conditions de l'amélioration des performances de la levure.

Bibliographie

- [1]. **Cecil (J.P.)**, 1995. The use of cassava starch in the artisanal production of maltose. In: Transformation alimentaire du manioc ; T. Agbor Egbe, A. Brauman, D. Griffon, S. Trèche (éd.) 1995; Edition O.R.S.T.O.M., 495-505.
- [2]. **Kling (J.C.)**, 1992. Qualité du maïs et nutrition. Guide de recherche de l'IITA, 33, Ibadan, Nigeria, 30p.
- [3]. **F.A.O.**, 1992. Production 1991 yearbook ; Statistics series, n°104, Vol. 45
- [4]. **F.A.O.**, 1998. Rapport annuel.
- [5]. **Derdelinckx (G.)**, 1990. Bières spéciales et malts spéciaux. Louvain Brewing Letters. 3^e année. ¾, 35-38.
- [6]. **Louembé (D.), Brauman (A.) , Tchicaya (F.) , Kobawila (S.C.)**, 1996. Etudes microbiologiques et biochimiques de la bouillie de maïs (Poto-Poto). Microbiologie – Aliments – Nutrition. 14, 245-253.
- [7]. **Louembé (D.), Kéléké (S.), Kobawila (S.C.) & Nzoussi (J.P.)**, 2004. Variabilité et amélioration de la technologie traditionnelle de production de la pâte fermentée de maïs au Congo. Tropicultura, 22. 211-218.
- [8]. **Mosha (A.C.) et Svanberg (U.)**, 1983. Preparation of weaning foods with high nutrient density using flour of germinated cereals. Food and Nutrition Bulletin, 5, 10-14.
- [9]. **Diakabana (P.), Louembé (D.), Kobawila (S.C.), Derdelinckx (G.)**, 2006. Characteristic parameters of traditional process in production of *boganda brandy in Congo* . (Sous presse).
- [10]. **Louembé (D.), Kobawila (S.C.), Kéléké (S.), Diakabana (P.) et Nkoussou Moulassou (BI.)**, 2002. Rouissage des tubercules de manioc à partir de "pied de cuve" à base de manioc roui. Tropicultura, 20. 3. 118-124.
- [11]. **Van Noort (G.) and Spence (C.)**, 1976. The Mahewu industry. S. Afr. Food Rev. 10, 129-133.

- [12]. **Moreau (Cl.)**, 1985. L'industrie japonaise et les biotechnologies : le consensus et la compétition. Cahiers des Ingénieurs Agronomes INA-PG ; Mensuel N° 382.
- [13]. **Steinkraus (K.H.)**, 1996. Handbook of indigenous fermented foods, 2nd ed, Marcel Dekker, New-York,
- [14]. **Schwartz (H.M.)**, 1956. Kaffroom malting and brewing studies. I. The kaffir brewing industry in South Africa. J. Sci. Food Agric. 7, 101-105.
- [15]. **Schweigart (F.), Fellingham (S.A.)**, 1963. A study of fermentation in the production of mahewu, an indigenous sour maize beverage of Southern Africa. Milchwissenschaft 18, 214-246.
- [16]. **Aidoo (K.E.)**, 1994. Application of biotechnology to indigenous fermented foods. Proc. Technol. Dev. Countries; 12, 83-93.
- [17]. **Ruud Valyasevi et Rosa (S.) Rolle**, 2002. An overview of small-scale food fermentation technologies in developing countries with special reference to Thailand : scope for improvement. International Journal of food Microbiology; 75, 231-239.
- [18]. **De Clerck (J.)**, 1984. Cours de Brasserie. Tome 1. Vol I, 2^e Edition revue. Université Catholique de Louvain ; Editeur : Chaire Jean De Clerck, Belgique.
- [19]. **Stewart (G.G.)**, 1985. New development in ethanol fermentation. MBAA, Tech. Q. , Vol. 22, 119 -123.
- [20]. **Horton (H.R.), Moran (L.A.), Ochs (R.S.), Rawn (J.D.) and Scrimgeour (K.G.)** 1993 Principles of Biochemistry. by Neil Patterson. Publishers/ Printice Hall.
- [21]. **Scriban (R.)** 1988. Réacteurs traditionnels à enzymes libres cas des industries de l'amidon. In : biotechnologie, Scriban (R.), coordonateur ; Tech ; Doc. Lavoisier, 3^e Ed., Paris, 461-468.
- [22]. **Silvestre (P.) et Arraudeau (M.)**. Le manioc. Collection : Coste (R.). Ed. Maisonneuve et Larose, Paris (V^e).

- [23]. **Bourdet (A)**, 1977. La biochimie du pain. La Recherche, n°74, Vol. 8, 37-46.
- [24]. **Rose (A.)**, 1981. La production des aliments et des boissons. Pour la Science, 120 -131.
- [25]. **Russel (I.) and Stewart (G.G.)**, 1985. Genetic manipulation of yeast strains. MBAA Tech. Q. Vol. 22.
- [26]. **Potus (J.)**, 1993. Influence des matières premières et des conditions de fabrication sur les réactions de Maillard en panification. A.T.I., I.A.A. : 543-548.
- [27]. **Brulé (G.)**, 1982. Les biotechnologies appliquées à l'agroalimentaire. Cours de l'ENSIA-Rennes, pp. 20-25.
- [28]. **Wang, (Y.Y.D) and Fields (M.L.)**, 1978. Germination of corn and sorghum in home to improve nutritive value. Journal of Food Science. Vol.43, 1113-1115.
- [29]. **Norris (K.) and Lewis (M.J.)**, 1985. Application of a commercial barley beta-amylase in brewing. MBAA. , Tech. Q. , Vol. 22, 154-158.
- [30]. **Nicolas (M.) et Daniel (C.)**, 1998. Activités Technologiques en microbiologie 1; sous la direction de Figarella (J.) et Leyral (G.). Collection Biologie Technique; C.R.D.P. Aquitaine; 75, cours Alsace-Lorraine, 33075 Bordeaux Cedex.
- [31]. **Devreux (A.)**, 1987. Le XXI^e Congrès de l'E.B.C. à Madrid. Cerevisia, Bruxelles, pp. 21 - 28
- [32]. **Rouland (C.)**, 1986. Contribution à l'étude des osidases digestives de plusieurs espèces de termites africains : purification et caractérisation des cellulases et xylanases de *Macrotermes mülléri* (Termitidae, Macrotermitinae) et son champignon symbiotique. Thèse de doctorat ès sciences, Université de Paris Val-de-Marne.
- [33]. **Home (S.)**, 1991. Hydrolysis of non-starch polysaccharides. Louvain Brewing Letters, 4^e année. N° 2, 3-9. Louvain-La-Neuve.

- [34]. **Leclercq (C.), Dalliès (N.) et Didierjean (L.)**, 2000. Functionality of barley and malt non starchy polysaccharides in the brewing process. Bios n°2, Congrès, 32-38.
- [35]. **Meel (C.G.V.)**, 1973. Une introduction au brassage de la bière. Heineken NV, Amsterdam, Hollande.
- [36]. **Marc (I.)**, 1982. La Levure en fermentation : Etude bibliographique. Bios, Vol. 13, N° 10, 45-53.
- [37]. **Soufleros (E.), Bertrand (E.)**, 1979. Rôle de la souche de levure dans la production des substances volatiles au cours de la fermentation du jus de raisin. Connaissance Vigne Vin 13, N° 3, 181-189.
- [38]. **Navarre (J.P.) et Navarre (C.)**, 1986. Manuel d'œnologie, Ed. J.B. Baillièrè ; 4^{ème} édition, 287 p.
- [39]. **Duteurtre (B.)**, 1986. La science du Champagne. La Recherche, N° 183, 1475-1489.
- [40]. **Marchetti (R.), Guerzoni (M.E.)**, 1987. Effets de l'interaction souche de levure/ composition du moût sur la production, au cours de la fermentation de quelques métabolites volatils. Connaissance Vigne Vin ; 21, N° 2, 113-125.
- [41]. **Lonvaud-Funel (A.), Masclef (J.Ph.), Joyeux (A.) et Paraskevo-Poulos (Y.)**, 1988. Etude des interactions entre levures et bactéries lactiques dans le moût de raisin. Connaissance Vigne Vin ; 22, N° 1, 11-24.
- [42]. **Gaillardin (C.), Heslot (H.)**, 1987. La levure. La Recherche. N° 188, Vol. 18, 586 -601.
- [43]. **Arnaud (A.) et Guiraud (J.P.)**, 1988. Biochimie microbienne. In : Biotechnologie, **Scriban (R.)**, coordonnateur ; Technique et Documentation Lavoisier. 3^e Ed., Paris, 67-202.
- [44]. **Desens (C.) et Lonvaud-Funel (A.)**, 1988. Étude de la constitution lipidique des membranes des bactéries lactiques utilisées en vinification. Connaissance Vigne Vin, 22, n°1, 25-52.

- [45]. **Manilal (V.B.), Narayanan (C.S.), Balagopalan (C.),** 1991. Cassava starch effluent treatment with concomitant SCP production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 7, 185-190.
- [46]. **Oyeyiola (G.P.),** 1991. Fermentation of Millet to produce Kamu a Nigerian starch-cake food. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 7, 196-201.
- [47]. **Ryder (D.S.) et Masschelein (C.A.),** 1985. *MBAA, Technical Quartaly, Vol. 2,* pp. 124-132.
- [48]. **Casey (P.G.) et Ingledew (W.M.),** 1985. *MBAA, Tech. Q., Vol. 22,* 133-141.
- [49]. **Diakabana (P.),** 1988. Influence de la température et de la teneur en glucose sur le comportement de la levure. Mémoire de Master, Université Catholique de Louvain, Louvain -La- Neuve.
- [50]. **Navarro (J.M.) et Durand (G.),** 1978. *Ann. Microbiologie, Inst. Pasteur, 129B,* 215-224.
- [51]. **Stockes (J.L.),** 1971. In : *The Yeasts, Rose (A.H.) et Harrosson (J.S.), Academic Press, London, Vol. 2.*
- [52]. **Coote (N.) et Kirsop (B.H.),** 1976. *Journal Inst. Brew., 82,* 149-153.
- [53]. **Dufour (J.P.),** 1987 ; Louvain, *Revue mensuelle de l'Association des Anciens et Amis de l'Université Catholique de Louvain, 10,* 17-20.
- [54]. **World Bank,** 1980. "Alcohol production from biomass" in the Developing Countries. 1818 H Street, N.W., Washington, D.C. 20433, U.S.A.
- [55]. **Holzappel (W.),** 1997. Use of starter cultures in fermentation on a household scale. *Food Control, Vol. 8, N° 5/6,* 241 - 258.
- [56]. **Etiévant (P.) et Issanchou (S.),** 1987. Le goût. *La Recherche, N° 193, Vol. 18,* 1344-1353.

- [57]. **Bertrand (A.) et Ségur (M.C.)**, 1988. Note : une approche de la dégustation analytique des eaux-de-vie d'Armagnac. *Connaissance Vigne Vin*, 22, n°3, 233-235.
- [58]. **Anonyme**, 1989. L'arôme des bourgognes. *Pour la Science*, n°145.
- [59]. **Gosselin (Y.), Debourg (A.), Fels (S.)**, 2000. Utilisation industrielle de levures sèches en brasseries. *Bios*, n° 2, Congrès, 32-38.
- [60]. **Jong H. Lee, Sae K. Lee, Kwan H. Park, In K. Hwan Geun E. Ji**, 1999. Fermentation of rice using amyolytic *Bifidobacterium*. *International Journal of Food Microbiology* 50, 155-161.
- [61]. **De Clerck (J.)**, 1963. Cours de Brasserie. Tome 2. Vol II, 2^e Edition. Université Catholique de Louvain ; Editeur : Chaire Jean De Clerck, Belgique.
- [62]. **Maïdou (E.), Kamayen (C.)**, 1994. Le Ngako, eau-de-vie de manioc, boisson traditionnelle en République Centre-africaine ; Communication au séminaire sur la technologie de fermentation appliquée à l'Afrique. Du 30 mai au 3 juin 1994. Université de Liège, 141-145.
- [63]. **C.E.E., 1973**. Directives des analyses ; Analyse des composants des aliments des animaux. Méthodes décrites dans les annexes des directives : N° 71/250 CEE du 15.6.71 ; N° 71/393 CEE du 18.11.71 ; N° 72/199 CEE du 27.4.72 ; N° 73/46 CEE du 5.12.72. Institut d'Enseignement Supérieur Agricole de l'Etat à Huy, Belgique.
- [64]. **E.B.C.**, 1975. *Analytica - EBC III*, 3^e Edition.
- [65]. **Ugboaja (F.C.), Bednarski (W.), Babuchowski (A.)**, 1991. The technology and properties of beer produced from unmalted sorghum or maize grains. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 7, 225-230.
- [66]. **Heineken**, 1986. Instruction pour le contrôle de la fabrication. Amsterdam, Hollande.
- [67]. **E.B.C.**, 1987. *Analytica - EBC*

- [68]. **Van Den Dool (H.) and Kratz (P.D.)** , 1963. A generalization of the retention index system including linear temperature programmed gas-liquid partition chromatography. *J. Chromatog.*,11, 463-471.
- [69]. **Mc Lafferty (F.W.) and Stauffer(D.B.)** ,1989. The Wiley NBS registry of Mass Spectral Data. 2nd Edition . J. Wiley and Son. NY.
- [70]. **Adams (R.P.)** ,2001. Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography Quadrupole Mass Spectroscopy .Allured Publishing Corp., Carol Stream ,IL.
- [71]. **Joulain (D.) and Konig (W. A.)**,1998 . The Atlas of Spectral Data of Sesquiterpene Hydrocarbons . E.B. Verlag,Hamburg.
- [72]. **Saito (N.)**, 1973. *Arch. Biochem. Biophys.* 155, 290.
- [73]. **Sai Ram (M.), Rao (C.V.) and Seenayya (G.)**, 1991. Caractéristiques of Clostridium, Thermocellum strain SS8: a broad saccharolytic thermophile. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 7, 272-275.
- [74]. **Leveau (J.Y.) et Bouix (M.)**, 1988. Cinétiques microbiennes. In: *Biotechnologie*, Scriban (R.), coordonnateur; Technique et Documentation Lavoisier, 3^e Ed., Paris, 203 -232.
- [75]. **Engasser (J.M.)**, 1988. Modélisation des processus de fermentation. In: *Biotechnologie*, Scriban (R.), coordonnateur; Technique et Documentation Lavoisier, 3^e Ed. Paris, 301-323.
- [76] **Larrieu (J.)**, 1988. Utilisation de la statistique en gestion de la qualité. In: *Biotechnologie*, Scriban (R.), coordonnateur; Technique et Documentation Lavoisier, 3^e Ed. Paris, 661-679.
- [77]. **Ayräpää (T.)**, 1971. Biosynthetic formation of higher alcohols by yeast . Dependance on the nitrogenous nutriment level of the medium. *Inst. Brew.*, Vol. 77 , 266-276.
- [78] **Haboucha (J.), Masschelein (C.A.) and Devreux (A.)**, 1987. E.B.C., *Prod. Congr.* 11th , Madrid, p.197.
- [79] **Robert I. Tenny**, 1985. Rationale of the brewery fermentation. *Fermentation Symposium-Part I. MBAA, Tech. Q.*, Vol.22, 115-118.

- [80] **Brett (T.R.L.), Nyampingidza (E.N.) and Guira (R.C.),** 1992. The analysis, identification and determination of toxic substances in kachasu. *Trans. Zimbabwe Sci. Assoc.* 66, 25-29.
- [81] **Mwesigye (P. K.), Okurut (T. O.)** 1995. A survey of the production and consumption of traditional alcoholic beverages in Uganda. *Proc. Biochem.* 30, 497-501.
- [82] **Gadaga (T.H.), Mutukumira (A.N.), Narvhus (J.A.), Feresu (S.B.),** 1999. A review of traditional fermented foods and beverages of Zimbabwe. *International Journal of Food Microbiology*, 53 ; 1-11.
- [83] **Akinrele (I.A.),** 1970. Fermentation studies on maize during the preparation of a traditional African starch-cake food. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 21, 619-625.

11

Annexes

Annexe I.

QUESTIONNAIRE SUR LE PROCÉDE TRATIONNEL DE PRODUCTION DU *boganda*.

Fiche individuelle N°.....

Date de l'enquête :.....

Nom et prénom de l'enquêteur :.....

I- Identification du producteur de *boganda* :

Nom et prénom (s).....

Sexe : femme Homme

Age :....., Niveau scolaire :.....

Nombre d'enfants à charge : Age des enfants ansans

Adresse de l'atelier :.....

Arrondissement :.....

Activités exercées :

- Activité principale.....
- Activité secondaire.....
- Activité tertiaire.....

II- Conditions opératoires de production du *boganda*

1- Matière premières :

1-1-Type de maïs utilisé :.....

- Provenance du maïs :.....
- Quantité utilisée :.....
- Durée de stockage :.....

1-2-Maïs germé (malt de maïs)- quantité utilisée :.....

1-3 Quantité de sucre utilisée :.....

1-4- Pied de cuve (motu ya massango) : Oui ; Non

Quantité utilisée :.....

1-5- Vinasse ou résidu de distillation utilisé : Oui ; Non

1-6- Levure de boulangerie utilisée : Oui ; Non

Quantité utilisée :

1-7- Eau utilisée :

Type d'eau : SNDE (robinet) ; Puits

Quantité d'eau : litres.

2- Equipements de fabrication :

2-2-Pour le broyage de malt de maïs :

2-2- Pour la cuisson du *foufou* :

2-3- Pour l'empâtage (mélange des ingrédients : bouillie de *foufou* + mouture de malt de maïs et pied de cuve + + eau).....

2-4- Pour la fermentation du moût après empâtage :.....

2-5- Pour la distillation :.....

Décrire les éléments du système de distillation :.....

.....

3 – Méthode traditionnelle de fabrication de *boganda* :

3-1- **Maltage du maïs :**

3-1-1 – Le trempage de maïs :

- Quantité de maïs utilisée :
- Volume d'eau utilisée :
- Combien de fois renouvelle – t – on l'eau de trempage ? fois.
- Durée du trempage :

3-1-2 – La germination du maïs :

- Comment opérez – vous pour l'étalage du maïs trempé en vue de la germination ?.....
- Comment appréciez – vous le terme de la germination ? (à partir de la longueur des organes de croissance ?).....
- Durée de la germination ? jours.

3-1-3 – Etouffement du maïs germé :

- Comment opérez – vous l'étouffement du maïs germé ?.....
-
- Comment appréciez – vous le terme de l'étouffement ?.....
-

- Durée de l'étouffement ? jours.

3-1-4 – Séchage du malt vert :

- Au soleil ? Oui Non
- Autre moyen ?.....
- Durée de séchage :.....

3-2 – **Fermentation** :

3-2-1 – Cuisson du fougou :

- Quelle quantité de *fougou* utilisez – vous ?.....
- Comment opérez-vous pour la cuisson du *fougou* ?.....
.....
- Utilisez-vous de l'eau bouillante ? Oui ; Non
- Utilisez-vous de la vinasse chaude (résidu de distillation) ?.....
..... Oui ; Non
- Utilisez – vous de l'eau bouillante et la vinasse ? Oui ; Non
- Quelle est la durée de refroidissement du *fougou* cuit ?.....
- Comment opérez-vous pour que la pâte de *fougou* devienne une bouillie par mélange avec de l'eau ?.....
.....
- Quels ingrédients mélangez-vous avec la bouillie ? malt kg ;
- Sucre kg ; Levure g ; Pied de cuve kg ; autres

3-2-2 – Fermentation proprement dite :

- Dans quel récipient mettez-vous le mélange liquide des ingrédients ?
- Quelle quantité utilisez-vous ?
- Quel est le volume final du mélange avant de fermer le récipient de fermentation ?.....
- Durée de la fermentation ?.....

3-3 – **Distillation** :

- Ajoutez-vous de l'eau avant de filtrer le moût fermenté ? Oui ; Non
- Quelle quantité d'eau utilisez-vous pour cela ?.....
- Quelle quantité de moût mettez-vous dans la chaudière ?.....
.....

Pourriez-vous nous donner environ 300ml de surnageant ? Oui ;
Non

- Cherchez-vous à récupérer les premières vapeurs qui apparaissent ?
- Oui ; Non
- Pourquoi ?.....
- Récupérez-vous les premières gouttes de distillat ?

Oui ; Non

- Pourquoi ?.....
- Quel est le volume de la première fraction de distillat (1^{ère} dose) ?
1 litre ; 1 litre et demi ; 2 litres ;
Autres volumes
- Quel est le volume de la deuxième fraction de distillat (2^{ème} dose) ?
 Litres ; parfois.....
- Quel est le volume de la troisième fraction ? litres ; parfois litres
- Quel est le volume de la quatrième fraction ? litres ; litres

N.B : L'enquêteur devra acheter 100ml (1 *ndutu*) de chaque fraction de distillat à stocker dans des flacons datés et numérotés F1, F2, F3 et F4. il devra remplir le tableau suivant , après avoir relevé les volumes des fractions de distillat recueillies (mettre une croix en ce qui concerne l'aspect).

Fraction	Volume recueilli par l'opérateur	Aspect		
		Clair	Trouble	Très trouble
F1litres			
F2litres			
F3litres			
F4litres			
F5litres			
Volume de coupagelitres			

- Quels sont les fractions qui entrent dans le coupage pour la formulation du *boganda* ?.....
Pourquoi ?.....
- Quel est le volume du *boganda* obtenu après coupage des fractions ?...
.....
- Votre produit varie-t-il d'une production à une autre ? Pourquoi ?.....
.....
- Quelles difficultés rencontrez-vous dans l'exercice de votre activité ?.....

Annexe II

TEST SENSORIEL DU *boganda* (une eau-de-vie à base de manioc)

Date :

Lieu de dégustation :

1- Tableau : Evaluation sensorielle des échantillons de *boganda* fabriqué au niveau de différents ateliers.

Qualités évaluées	Evaluation maximale	Atelier de production de <i>boganda</i>															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Clarté	20																
2. Odeur	20																
3. Arôme	20																
4. Brûlant (alcool)	20																
5. Piquant (acide)	10																
6. Astringent	10																
7. Evaluation globale par sommation	100																
8. Evaluation par appréciation globale	100																

Conduits 25°C dans des conditions les plus appropriées possibles, les tests sensoriels portent sur six (6) qualités (6 caractères) de *boganda* : la clarté, l'odeur, l'arôme, le brûlant (alcool), le piquant (acide), l'astringent.

Tous les tests effectués sont des tests de différence entre 2 échantillons de *boganda* (test triangulaires : 2 verres contenant un même produit et un troisième verre contenant un produit différent).

2- Le jury de dégustation (Panel) du *boganda*

Pour le test sensoriel, deux séances de dégustation séparées de un à trois jours sont réalisées pour les mêmes échantillons de *boganda*. Le Jury de dégustation est composé de 42 personnes dont :

- 35 personnes habituellement consommatrices de *boganda* (25 du Congo-Brazzaville et 5 du Congo-Kinshasa) ;
- 7 personnes découvrant le produit (1 Vietnamien, 6 Congolais).

3- Fiche de dégustation

Il s'agit d'un test triangulaire dont deux verres contiennent un même échantillon de *boganda* et un troisième verre contenant un échantillon différent (**Annexe III**).

Nom du dégustateur :

Date de dégustation :

Qualités évaluées	Echantillon CAB					Echantillon BAD					Echantillon DBA				
	Echelle de perception :					Echelle de perception :					Echelle de perception :				
	Mauvais(e)	Médiocre	Moyen(ne)	Bon (ne)	Très bon(ne)	Mauvais (e)	Médiocre	Moyen (ne)	Bon (ne)	Très bon(e)	Mauvais (e)	Médiocre	Moyen (e)	Bon (ne)	Très Bon (ne)
1. Clarté															
2. Odeur															
3. Arôme															
4. Brûlant (alcool)															
5. Piquant (acide)															
6. Astringent															
7. Evaluation globale de chaque échantillon de Boganda	Mauvais :	<input type="checkbox"/>				Mauvais :	<input type="checkbox"/>				Mauvais :	<input type="checkbox"/>			
	Médiocre :	<input type="checkbox"/>				Médiocre :	<input type="checkbox"/>				Médiocre :	<input type="checkbox"/>			
	Satisfaisant :	<input type="checkbox"/>				Satisfaisant :	<input type="checkbox"/>				Satisfaisant :	<input type="checkbox"/>			
	Bon :	<input type="checkbox"/>				Bon :	<input type="checkbox"/>				Bon :	<input type="checkbox"/>			
	Excellent :	<input type="checkbox"/>				Excellent :	<input type="checkbox"/>				Excellent :	<input type="checkbox"/>			

Quels sont les deux produits identiques ?	
Quel est le produit différent ?	
Lequel de ces trois produits préférez-vous ?	
Décodage des échantillons	

NB : mettre une croix (X) dans la case correspondant à votre choix.

Observation :

Annexe IV

Détermination de la teneur en éthanol.

- Par pycnométrie selon la méthode E.B.C. décrite par De Clerck [61].

Dans un ballon de 500 ml, peser 100 g $\pm 0,1$ g de moût filtré et installer le dispositif de distillation ;

Après avoir recueilli 85 ml de distillat, ramener cette quantité à 100 g $\pm 0,1$ g avec de l'eau distillée par pesée ;

Après homogénéisation, déterminer la densité du distillat au moyen d'un pycnomètre Gay-Lussac à 20°C ;

A partir de la mesure de cette densité, évaluer le titre alcoométrique du moût fermenté suivant la table de conversion de Goldiner et Klemann.

Cette technique nous permet de suivre l'évolution de la fermentation alcoolique du moût de *boganda*.

TABLE D'ALCOOL
selon GOLDINER et KLEMANN ⁽³⁾

donnant les teneurs en alcool % en poids pour les densités
à 20°/20"

Densité	%	Densité	%	Densité	%	Densité	%
1,00000	0,00	0,99963	0,20	0,99926	0,40	0,99888	0,60
0,99998	1	61	1	24	1	87	1
97	2	60	2	22	2	85	2
95	3	58	3	21	3	83	3
93	4	56	4	19	4	81	4
91	5	54	5	17	5	79	5
89	6	52	6	15	6	77	6
87	7	50	7	13	7	76	7
86	8	49	8	11	8	74	8
84	9	47	9	09	9	72	9
0,99982	0,10	0,99945	0,30	0,99907	0,50	0,99870	0,70
80	1	43	1	05	1	68	1
78	2	41	2	03	2	66	2
76	3	39	3	02	3	64	3
75	4	37	4	00	4	62	4
73	5	35	5	0,99898	5	60	5
71	6	33	6	96	6	59	6
69	7	32	7	94	7	57	7
67	8	30	8	92	8	55	8
65	9	28	9	90	9	53	9
0,99963	0,20	0,99926	0,40	0,99888	0,60	0,99851	0,80

⁽³⁾ F. GOLDINER et H. KLEMANN, *Tafeln zur Umrechnung der Spezifischen Gewichte von Alkohol — Wassermischungen auf Gewichtsprozent Alkohol*, Berlin, 1951 (Institut für Gärungsgewerbe, Berlin N 65).

TABLE D'ALCOOL

Densité	%	Densité	%	Densité	%	Densité	%
0,99851	0,80	0,99777	1,20	0,99704	1,60	0,99631	2,00
49	1	75	1	02	1	29	1
47	2	73	2	00	2	28	2
45	3	71	3	0,99698	3	26	3
43	4	70	4	97	4	24	4
41	5	68	5	95	5	22	5
39	6	66	6	93	6	20	6
37	7	64	7	91	7	19	7
35	8	62	8	89	8	17	8
33	9	60	9	87	9	15	9
0,99832	0,90	0,99758	1,30	0,99685	1,70	0,99613	2,10
30	1	57	1	84	1	11	1
28	2	55	2	82	2	10	2
26	3	53	3	80	3	08	3
24	4	51	4	78	4	06	4
22	5	49	5	76	5	04	5
20	6	47	6	74	6	02	6
19	7	46	7	72	7	00	7
17	8	44	8	71	8	0,99599	8
15	9	42	9	69	9	97	9
0,99813	1,00	0,99740	1,40	0,99667	1,80	0,99595	2,20
11	1	38	1	65	1	93	1
09	2	37	2	64	2	91	2
08	3	35	3	62	3	89	3
06	4	33	4	60	4	87	4
04	5	31	5	58	5	86	5
02	6	29	6	56	6	84	6
00	7	28	7	54	7	82	7
0,99798	8	26	8	52	8	80	8
97	9	24	9	50	9	78	9
0,99795	1,10	0,99722	1,50	0,99649	1,90	0,99577	2,30
93	1	20	1	47	1	75	1
91	2	18	2	45	2	73	2
90	3	17	3	44	3	71	3
88	4	15	4	42	4	69	4
86	5	13	5	40	5	67	5
84	6	11	6	38	6	65	6
82	7	09	7	36	7	64	7
80	8	07	8	35	8	62	8
79	9	06	9	33	9	60	9
0,99777	1,20	0,99704	1,60	0,99631	2,00	0,99559	2,40

TABLE D'ALCOOL

Densité	%	Densité	%	Densité	%	Densité	%
0,99559	2,40	0,99489	2,80	0,99421	3,20	0,99352	3,60
57	1	87	1	19	1	50	1
55	2	85	2	17	2	49	2
53	3	83	3	16	3	47	3
52	4	81	4	14	4	45	4
50	5	80	5	12	5	43	5
48	6	78	6	11	6	42	6
46	7	76	7	09	7	40	7
44	8	75	8	07	8	38	8
42	9	73	9	05	9	37	9
0,99541	2,50	0,99472	2,90	0,99404	3,30	0,99335	3,70
39	1	70	1	02	1	33	1
37	2	68	2	00	2	32	2
35	3	67	3	0,99398	3	30	3
33	4	65	4	96	4	28	4
32	5	63	5	95	5	27	5
30	6	62	6	93	6	25	6
28	7	60	7	91	7	23	7
26	8	58	8	89	8	21	8
25	9	57	9	88	9	19	9
0,99523	2,60	0,99455	3,00	0,99386	3,40	0,99318	3,80
21	1	53	1	84	1	16	1
20	2	51	2	83	2	14	2
18	3	50	3	81	3	13	3
16	4	48	4	79	4	11	4
14	5	46	5	77	5	09	5
13	6	45	6	76	6	08	6
11	7	43	7	74	7	06	7
09	8	42	8	72	8	04	8
07	9	40	9	70	9	03	9
0,99506	2,70	0,99438	3,10	0,99369	3,50	0,99301	3,90
04	1	36	1	67	1	0,99299	1
02	2	35	2	65	2	98	2
00	3	33	3	64	3	96	3
0,99499	4	31	4	62	4	94	4
97	5	30	5	60	5	93	5
95	6	28	6	59	6	91	6
94	7	26	7	57	7	89	7
92	8	24	8	55	8	88	8
90	9	23	9	54	9	86	9
0,99489	2,80	0,99421	3,20	0,99352	3,60	0,99285	4,00

TABLE D'ALCOOL

Densité	%	Densité	%	Densité	%	Densité	%
0,99285	4,00	0,99220	4,40	0,99154	4,80	0,99089	5,20
83	1	18	1	53	1	87	1
82	2	16	2	51	2	85	2
80	3	15	3	49	3	84	3
79	4	13	4	47	4	82	4
77	5	12	5	46	5	81	5
75	6	10	6	44	6	79	6
74	7	09	7	42	7	77	7
72	8	07	8	41	8	76	8
70	9	05	9	39	9	74	9
0,99269	4,10	0,99203	4,50	0,99138	4,90	0,99073	5,30
67	1	02	1	36	1	71	1
65	2	00	2	34	2	69	2
64	3	0,99199	3	33	3	68	3
62	4	97	4	31	4	66	4
60	5	96	5	29	5	64	5
59	6	94	6	27	6	63	6
57	7	92	7	26	7	61	7
55	8	90	8	24	8	59	8
54	9	89	9	23	9	58	9
0,99252	4,20	0,99187	4,60	0,99121	5,00	0,99057	5,40
51	1	85	1	19	1	55	1
49	2	84	2	18	2	54	2
47	3	82	3	16	3	52	3
46	4	81	4	14	4	51	4
44	5	79	5	13	5	49	5
42	6	77	6	11	6	47	6
41	7	75	7	10	7	45	7
39	8	74	8	08	8	44	8
37	9	73	9	06	9	42	9
0,99236	4,30	0,99171	4,70	0,99105	5,10	0,99041	5,50
34	1	69	1	03	1	40	1
33	2	67	2	02	2	38	2
31	3	66	3	00	3	37	3
29	4	64	4	0,99098	4	35	4
28	5	63	5	97	5	33	5
26	6	61	6	95	6	32	6
24	7	59	7	93	7	30	7
23	8	58	8	92	8	29	8
21	9	56	9	90	9	27	9
0,99220	4,40	0,99154	4,80	0,99089	5,20	0,99026	5,60

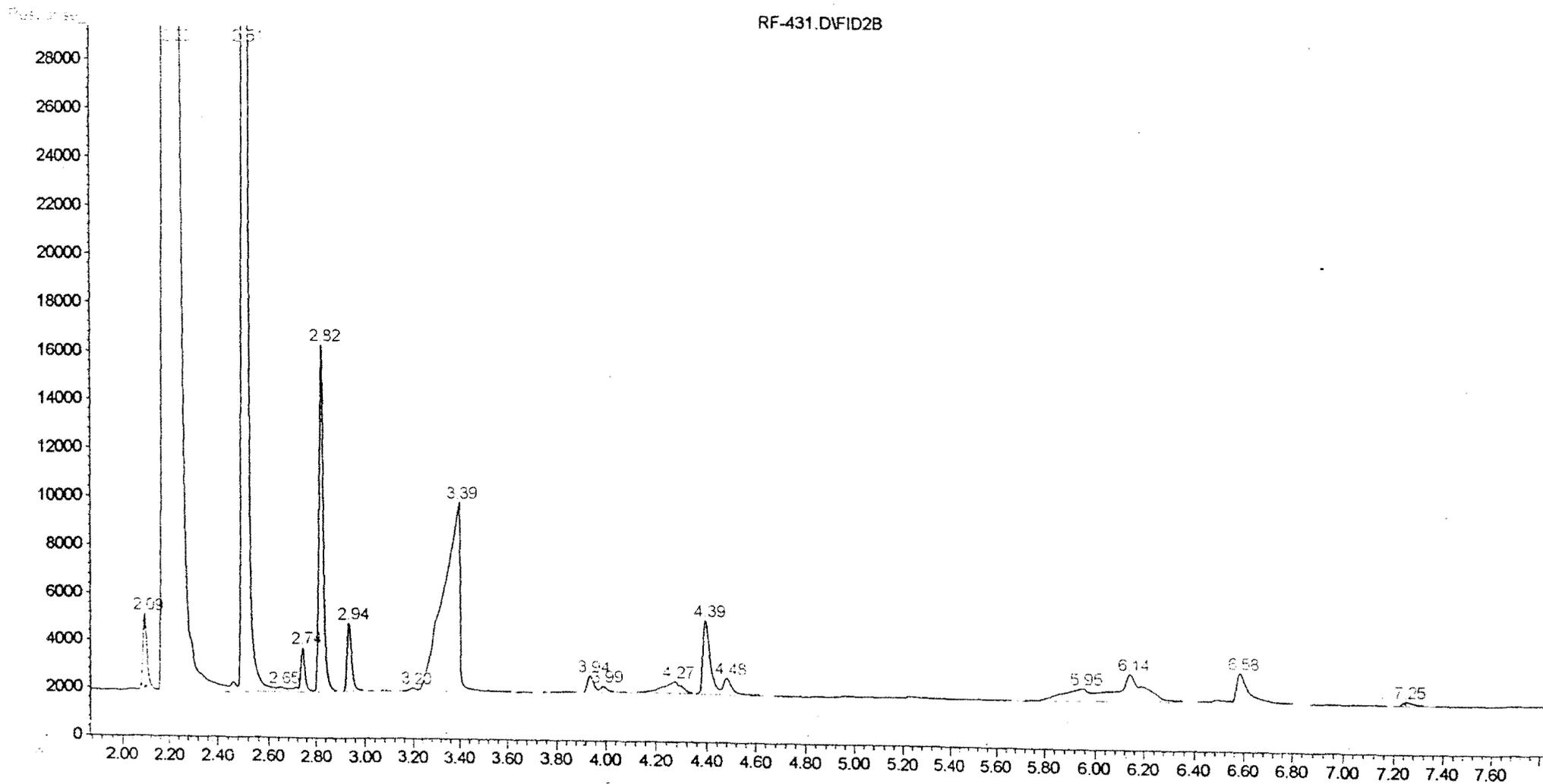
TABLE D'ALCOOL

Densité	%	Densité	%	Densité	%	Densité	%
0,99026	5,60	0,98962	6,00	0,98899	6,40	0,98837	6,80
24	1	61	1	97	1	35	1
23	2	59	2	96	2	34	2
21	3	58	3	94	3	32	3
19	4	56	4	92	4	30	4
18	5	55	5	91	5	29	5
16	6	53	6	89	6	27	6
14	7	52	7	88	7	26	7
13	8	50	8	86	8	24	8
11	9	49	9	85	9	23	9
0,99010	5,70	0,98947	6,10	0,98883	6,50	0,98821	6,90
08	1	45	1	82	1	20	1
07	2	44	2	80	2	19	2
05	3	42	3	78	3	17	3
03	4	41	4	76	4	15	4
02	5	40	5	75	5	14	5
00	6	38	6	74	6	12	6
0,98999	7	36	7	72	7	11	7
97	8	34	8	70	8	10	8
95	9	33	9	69	9	08	9
0,98994	5,80	0,98931	6,20	0,98867	6,60	0,98807	7,00
92	1	29	1	66	1	06	1
90	2	28	2	64	2	04	2
89	3	26	3	62	3	03	3
87	4	24	4	61	4	01	4
86	5	23	5	59	5	00	5
84	6	22	6	58	6	0,98798	6
83	7	20	7	56	7	97	7
81	8	18	8	55	8	95	8
80	9	17	9	53	9	94	9
0,98978	5,90	0,98915	6,30	0,98852	6,70	0,98792	7,10
76	1	13	1	50	1	91	1
74	2	12	2	49	2	89	2
73	3	10	3	47	3	88	3
71	4	09	4	46	4	86	4
70	5	07	5	44	5	85	5
68	6	05	6	43	6	83	6
67	7	04	7	41	7	82	7
65	8	02	8	40	8	80	8
63	9	0,98901	9	38	9	79	9
0,98962	6,00	0,98899	6,40	0,98837	6,80	0,98777	7,20

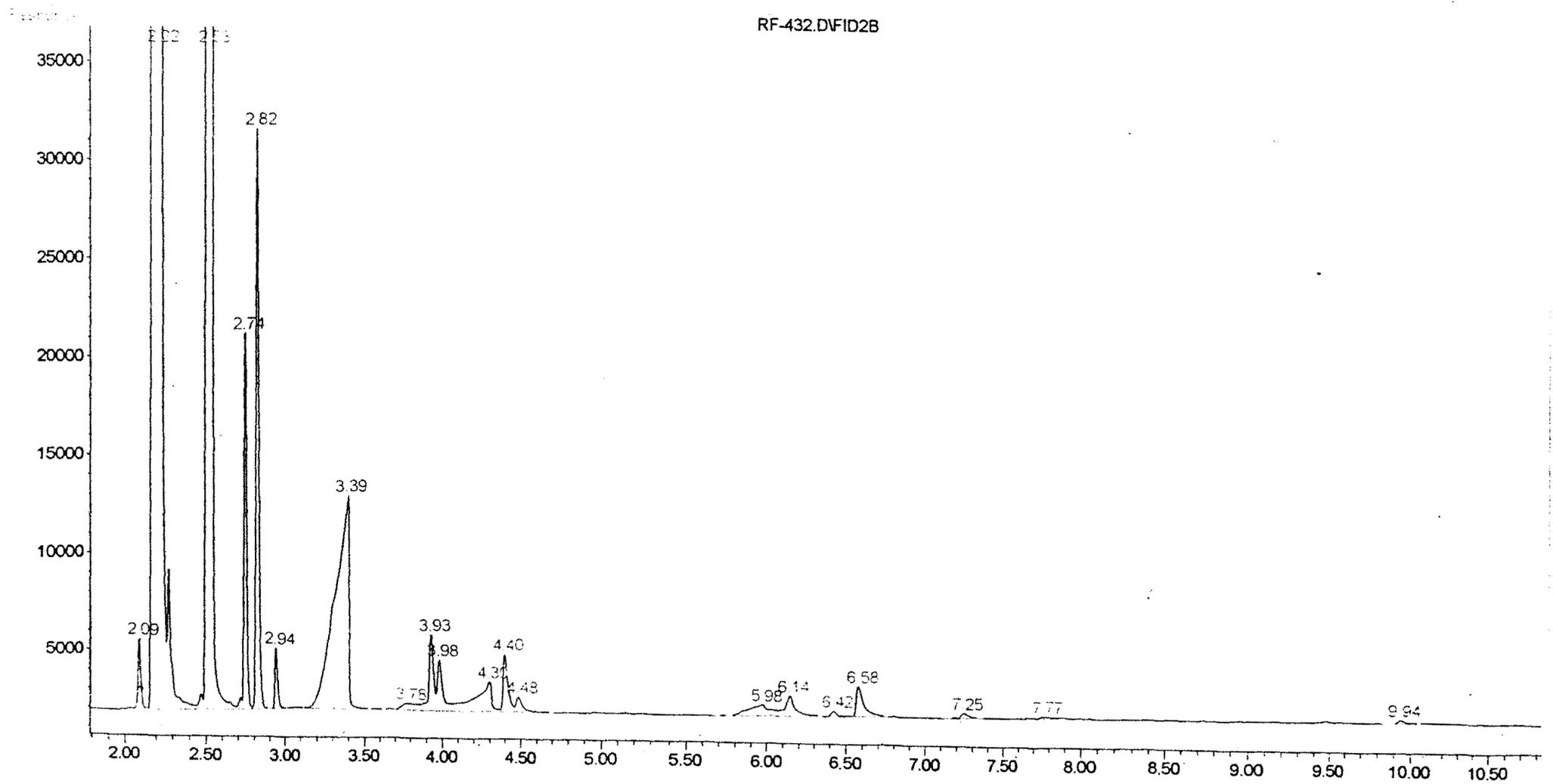
Densité	%	Densité	%	Densité	%	Densité	%
0,98777	7,20	0,98747	7,40	0,98717	7,60	0,98687	7,80
76	1	46	1	16	1	86	1
75	2	44	2	14	2	84	2
73	3	43	3	13	3	83	3
72	4	41	4	11	4	81	4
70	5	39	5	10	5	80	5
68	6	38	6	08	6	78	6
67	7	36	7	07	7	77	7
65	8	35	8	05	8	75	8
64	9	33	9	04	9	74	9
0,98762	7,30	0,98732	7,50	0,98702	7,70	0,98672	7,90
60	1	30	1	00	1	71	1
59	2	29	2	0,98699	2	69	2
57	3	27	3	98	3	68	3
56	4	26	4	96	4	66	4
55	5	24	5	94	5	65	5
53	6	23	6	93	6	63	6
52	7	22	7	92	7	62	7
50	8	20	8	90	8	60	8
49	9	19	9	89	9	59	9
0,98747	7,40	0,98717	7,60	0,98687	7,80	0,98657	8,00

**Annexe V – Chromatogrammes des échantillons
de *boganda***

1- Echantillon provenant d'un atelier (21°GL)

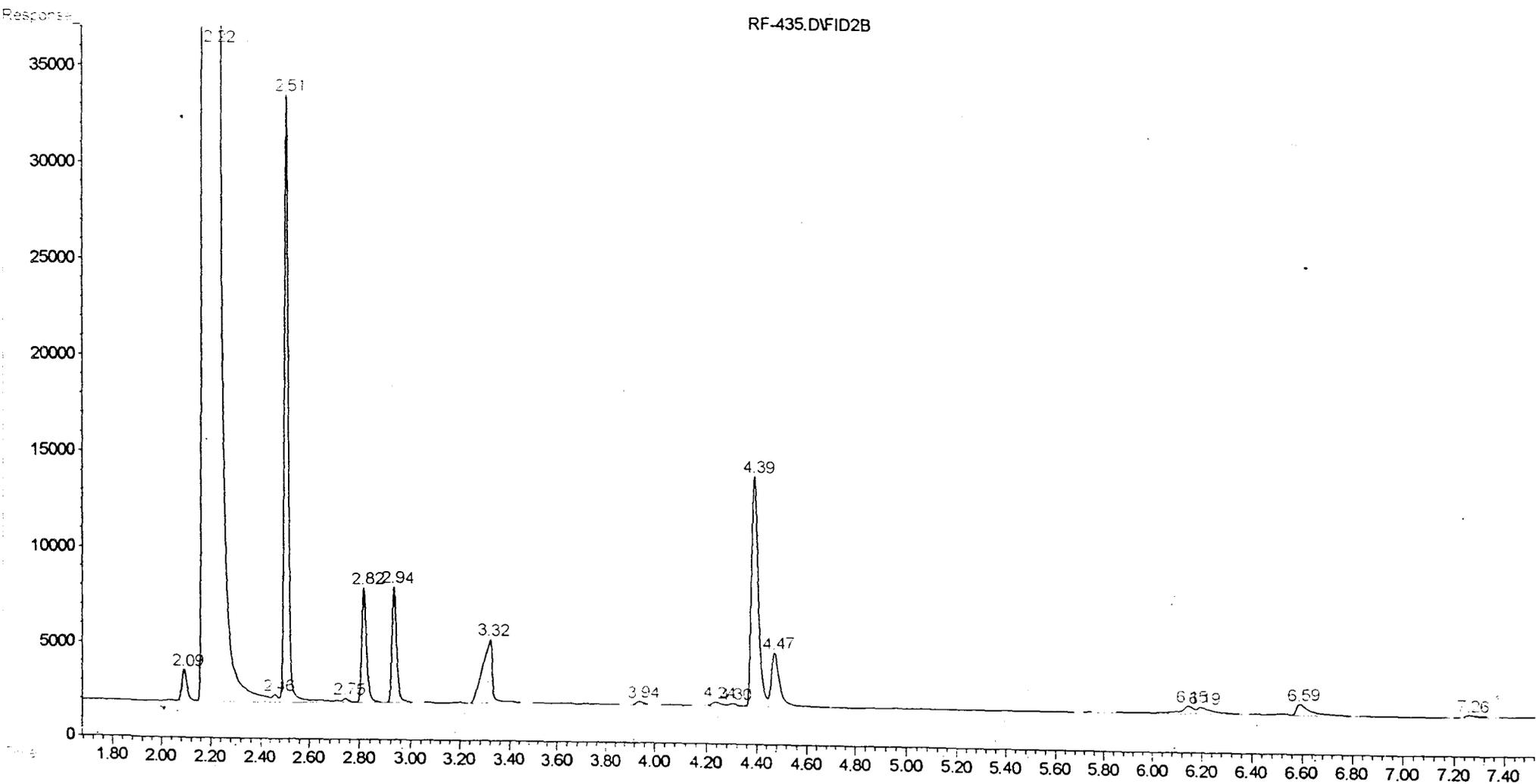


2- Echantillon provenant d'un deuxième atelier (24°GL)

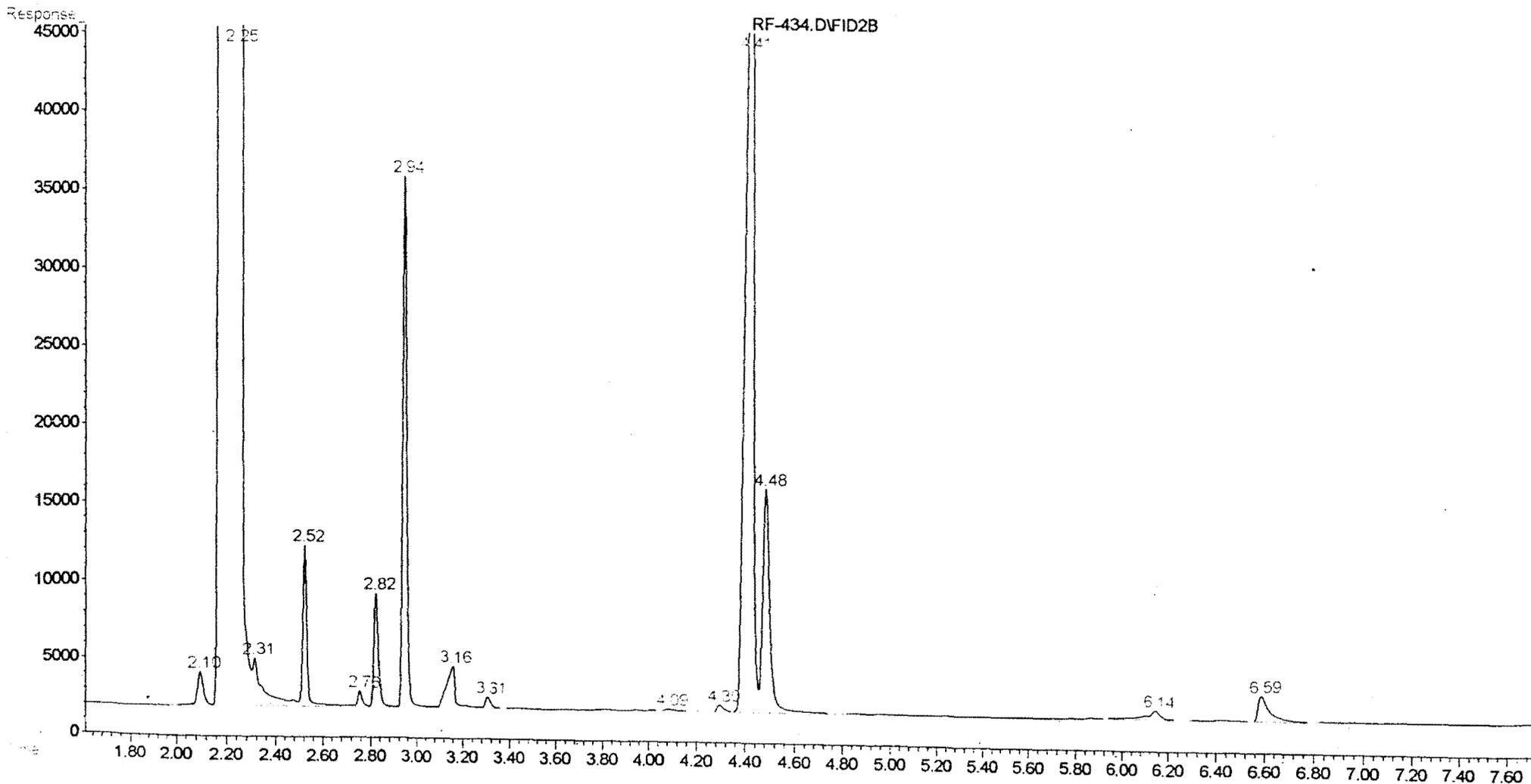


3- Echantillon provenant d'un troisième atelier (27°GL)

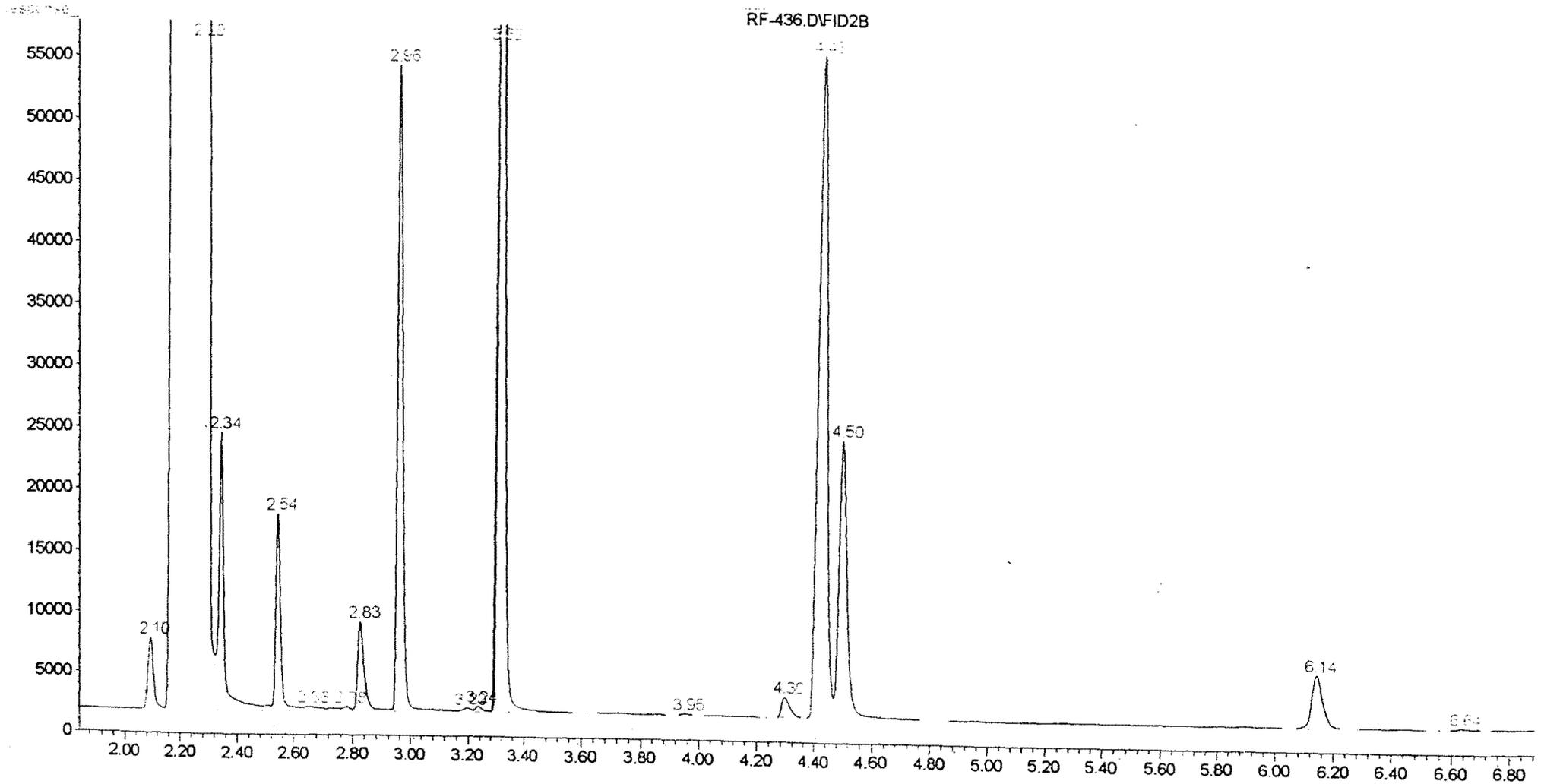
RF-435.D\FID2B



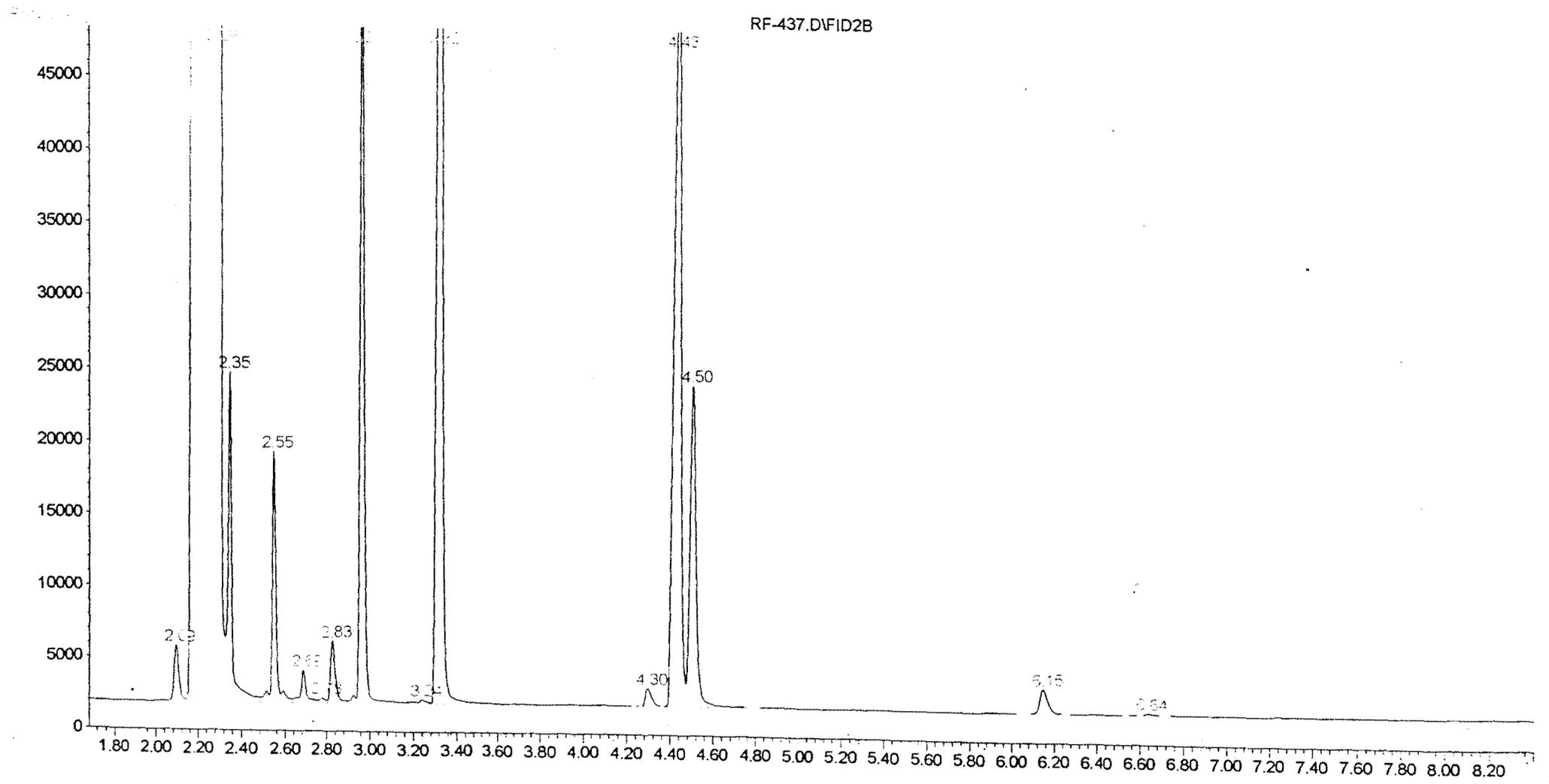
4- Première fraction de distillat de l'atelier n°3 (40°GL)



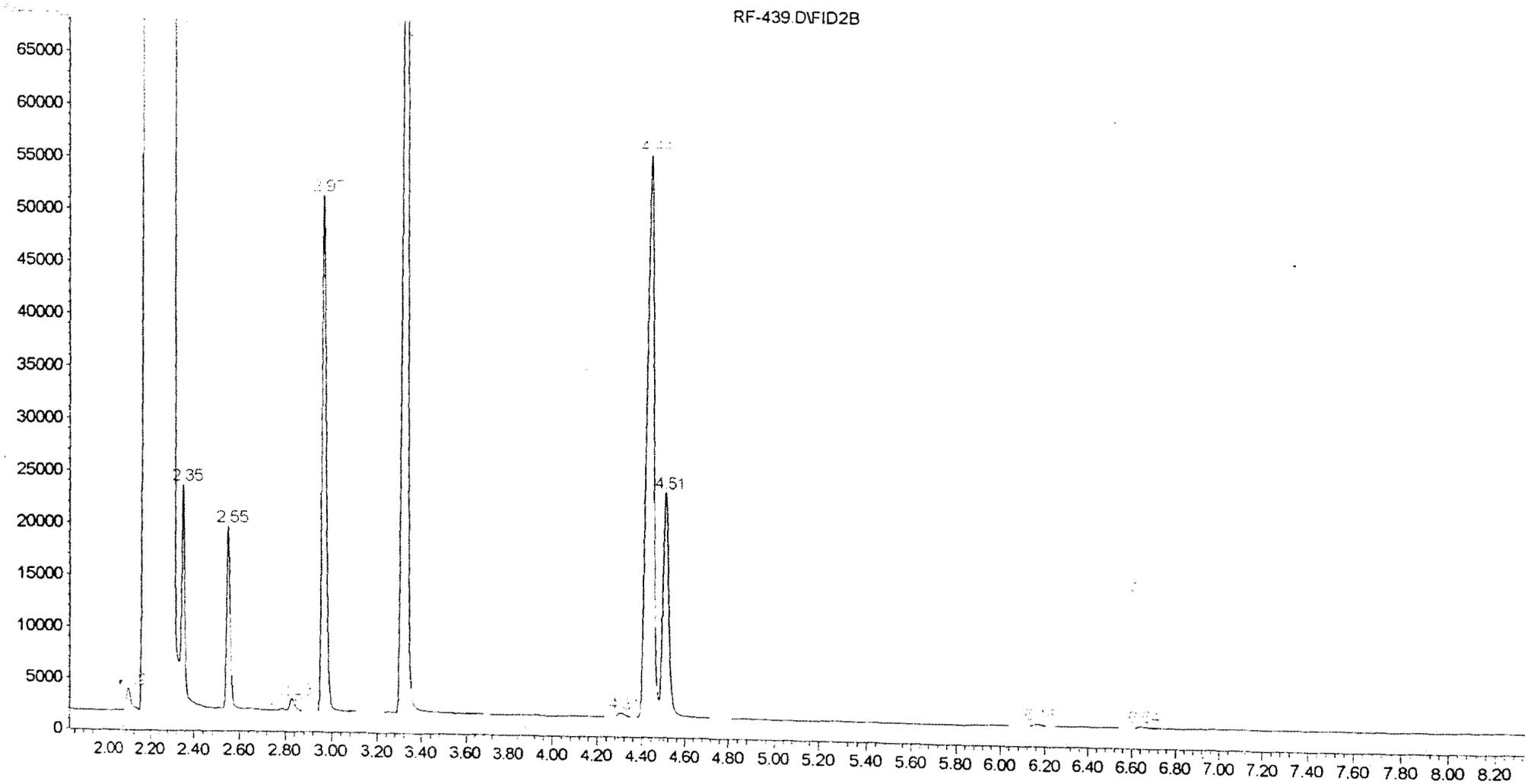
5- Première fraction (F1) du distillat de laboratoire (39°GL)



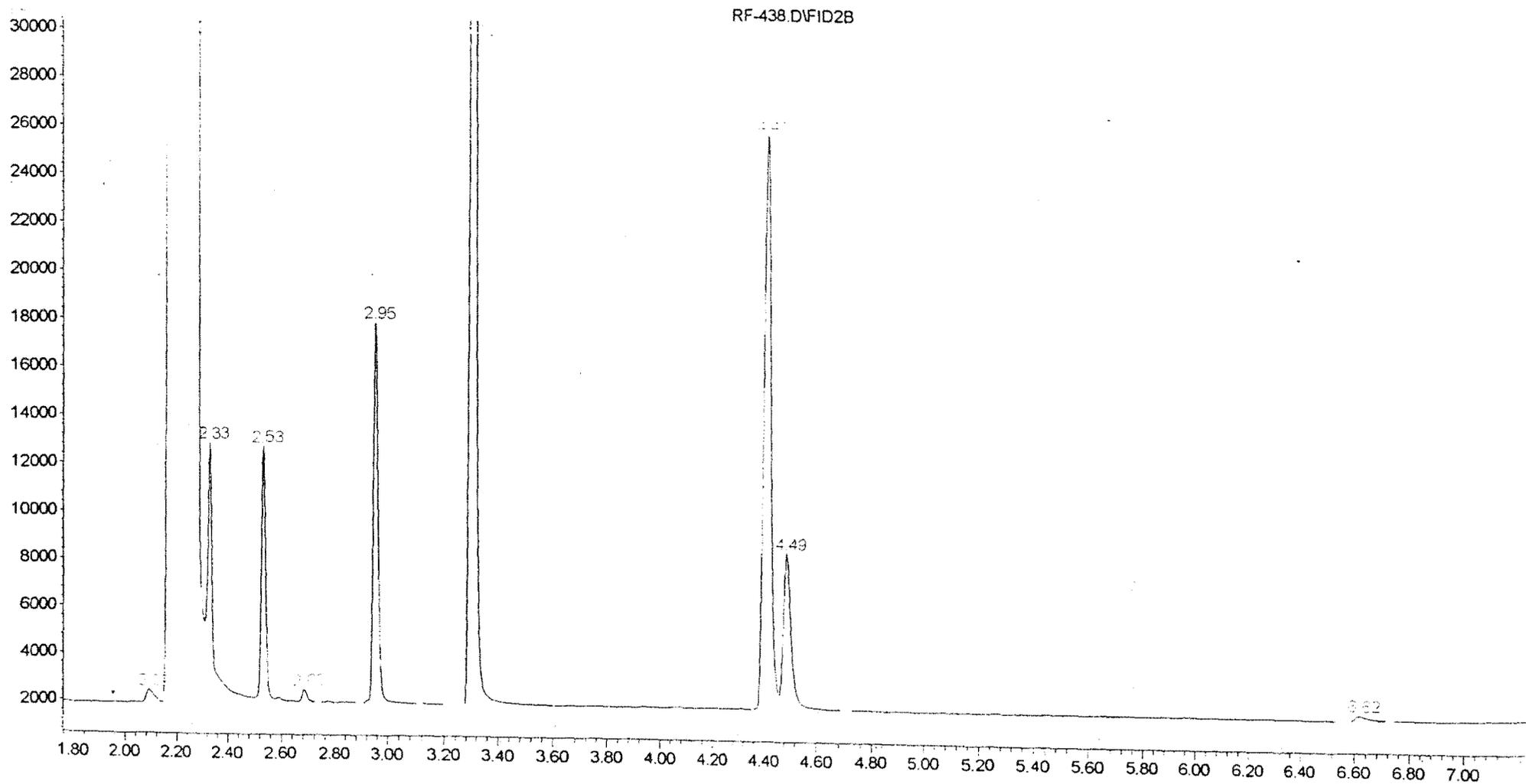
6- Deuxième fraction (F2) du distillat de laboratoire (29°GL)



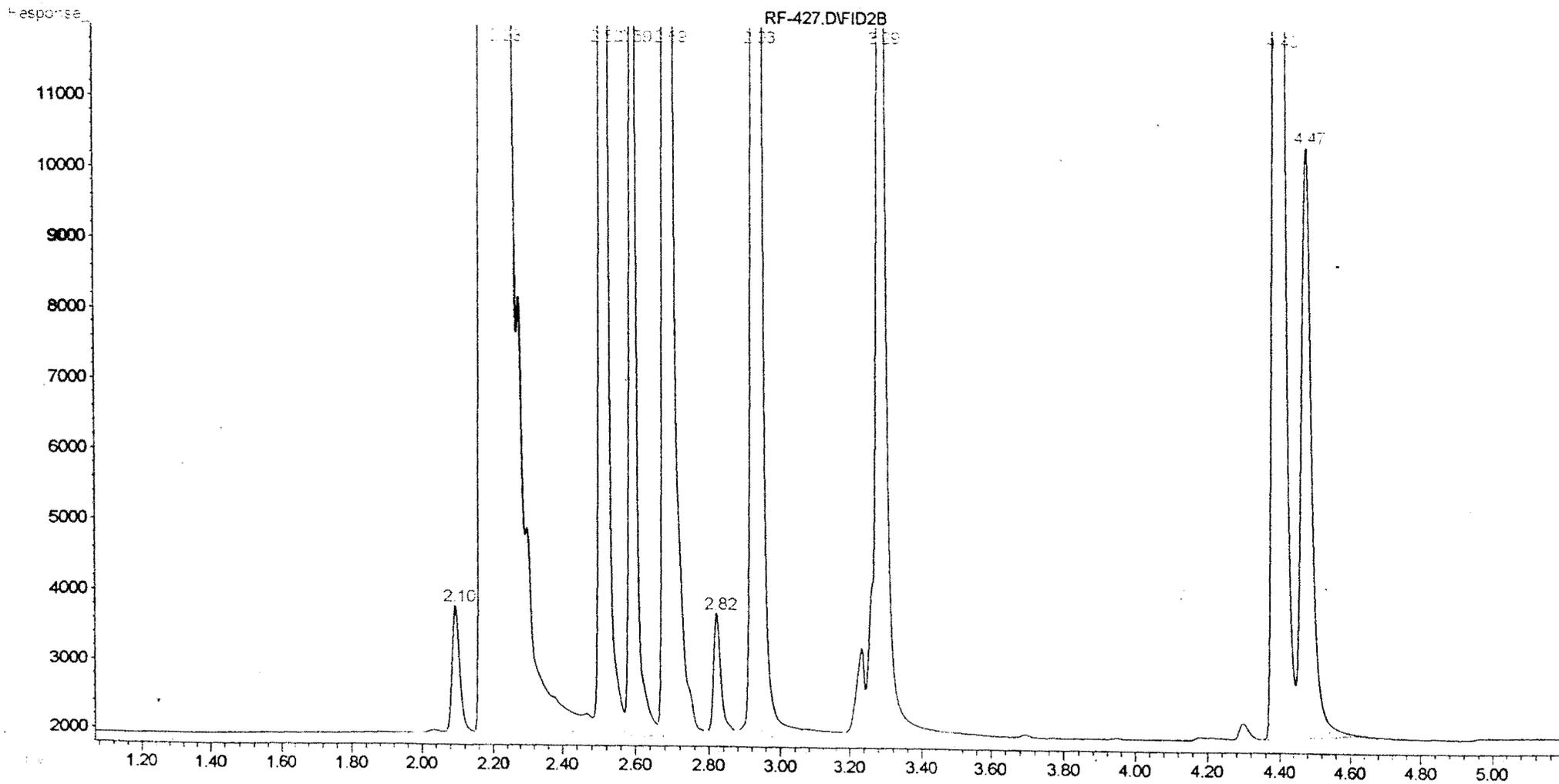
7- Troisième fraction (F3) du distillat de laboratoire (20°GL)



8- Quatrième fraction (F4) du distillat de laboratoire (13°GL)



9- Eau - de - vie provenant d'un coupage des fractions de distillat de laboratoire
(26°GL)



Annexe VI

Dosage de l'activité α -amylasique du malt de maïs

Afin de pouvoir apprécier le ratio α -amylase / amidon dans le moût, l'activité α -amylasique du malt de maïs utilisé est déterminée selon la méthode modifiée de titration iodique à 690 nm, [60 ; 72 ; 73].

Les essais sont effectués en triple avec un témoin blanc (ne contenant pas de préparation enzymatique).

a) préparation de la solution d' α -amylase du malt de maïs

5 g de grains de malt de maïs (taux de matière sèche : 92,17%) sont pesés et broyés au mortier avec 50 ml de solution NaCl à 1 % en présence d'un peu de sable de Fontainebleu. Le broyat est transvasé dans un bécher et laissé macérer au réfrigérateur pendant 60 minutes. Il est ensuite centrifugé pendant 10 minutes à 4 000 tours / minute ; le surnageant obtenu est la solution enzymatique.

b) Mode opératoire

Dans un tube à essais (tube à visser), sont mélangés 0,25 ml de solution enzymatique, 0,25 ml de tampon glycine-NaOH 0,05 M pH 9,0 et 0,5 ml de suspension (empois) d'amidon soluble, 0,2 %. Pour l'essai témoin 0,25 ml d'eau distillée est utilisé à la place de l'enzyme.

Après incubation à 50° C pendant 10 minutes, la réaction est arrêtée avec 1 ml d'acide acétique 1,5 N, puis 1 ml de réactif ioduré (0,2 % I₂ et 2,0 % KI) est ajouté à la solution.

Après homogénéisation, la densité optique à 690 nm est lue contre le témoin sans enzyme.

Une unité U d' α - amylase est la quantité d'enzyme qui réduit l'extinction de 10%.

L'activité α - amylasique est exprimée par : $xU \times \frac{92,17}{100} \times \frac{50}{0,25} \times \frac{1}{5g} = yU/gMS$

Annexe VII

Dosage des sucres réducteurs par la méthode classique de Bertrand [61]

Les sucres renfermant un groupement aldéhyde ou cétone libre sont oxydés en milieu alcalin.

Le dosage des sucres réducteurs est basé sur la réduction de sels cuivriques en oxyde cuivreux . La liqueur de Fehling est utilisée comme oxydant . La quantité de Cu_2O formé correspond à la quantité de sucres réducteurs dans le moût . Chaque essai est réalisé en triple .

6 ml de moût dilué 10 à 20 fois sont mis dans un tube pour l'essai expérimental , et 6ml d'eau distillée dans un autre tube pour l'essai témoin .Les tubes reçoivent ensuite chacun 6ml de liqueur de Fehling, et sont chauffés dans un bain-marie bouillant pendant 10 minutes .Il se forme un précipité rouge brique(Cu_2O) .

La liqueur de Fehling surnageante , qui doit encore être bleue (sinon on recommence l'opération en diluant davantage le moût) , est centrifugée à 4000 tours par minute pendant 10 minutes . Le surnageant ainsi obtenu est transvasé dans un autre tube à essais propre et sec .

La lecture de la densité optique (DO) à 650nm est effectuée par rapport à l'eau distillée . La différence de densité optique entre le témoin et l'échantillon donne la quantité de sucres dans l'échantillon testé en utilisant la courbe d'étalonnage .

La courbe d'étalonnage est établie à partir d'une solution de glucose de différentes concentrations (2mg/ml ; 4mg/ml ; 6mg/ml ; 8mg/ml ; 10mg/ml) avec un témoin sans glucose . Tous les essais sont traités de la même façon que pour le moût à tester .



Résumé

Le boganda, eau-de-vie à base de manioc (*Cassia tor* L.) rouie et séchée et de maïs (*Zea mays* sp.) moûté, est un alcool de bouche apprécié au Congo (notation globale = 60,6/100 d'après le test de dégustation). Il procure un revenu intéressant à ses producteurs quoique sa qualité soit fort variable (CV = 33,33% - 148%) en fonction

des endroits où il est fabriqué.

La production se fait en trois étapes : le maillage de maïs, la fermentation et finalement la distillation. Le maïs utilisé subit d'abord, durant 5 jours selon la qualité du grain, une germination dont l'arrêt est assuré en étouffant les grains germés pendant 5 jours et permettant la potentialisation de l'activité α -amylasique (158 U/gMS) du maïs de maïs.

La bouillie obtenue en mélangeant la mouture grossière du maïs et l'empois de fufufu (racine de manioc rouie et séchée) est fermentée par différentes souches de *Saccharomyces cerevisiae*. Cette fermentation qui doit être mixte, peut être assimilée à celle responsable de l'acétate. Néanmoins représentant 90% de métabolites volatils, les autres métabolites, quelques présents dans le boganda en quantités mineures (3,5% pour l'acide salicylique et 0,114% pour l'alcool iso amylique) doivent participer à la qualité sensorielle.

Une dernière amélioration de produit passe par le maîtrise de la germination : trempage séquentiel de grains de maïs et arrêt de la germination lorsque la longueur de la radicule atteint 30 à 60 mm ; ce qui permet d'éviter la formation d'arômes et de goût indésirables et l'augmentation de l'activité α -amylasique de 37,5% (217 U/gMS) par rapport au trempage unique.

Le lavage du moût améliore le rendement de saccharification de 4,5% et celui de la conversion d'amidon en éthanol de 6%. Il permet la diminution de la teneur en acide salicylique de 4 fois moins et l'augmentation de celle d'alcool iso amylique d'un facteur de 1,3 dans le boganda.

Mots clés : eau-de-vie, α -amylase, métabolites, éthanol, optimisation, boganda.