



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
D'ANTSIRABE-VAKINANKARATRA



MENTION : GENIE INDUSTRIEL

PARCOURS : GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER,  
TITRE D'INGENIEUR EN

GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

**« OPTIMISATION DE FABRICATION  
DE L'ETHANOL A PARTIR DE LA  
FARINE DE MANIOC PAR VOIE  
D'HYDROLYSE ENZYMATIQUE »**

Présenté par : **RANDRIANARIVELO Herilanto Ignace**

Soutenu le 01 Février 2022

Promotion 2020



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
D'ANTSIRABE-VAKINANKARATRA



**MENTION : GENIE INDUSTRIEL**

**PARCOURS : GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET INDUSTRIELS**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER,**

**TITRE D'INGENIEUR EN**

**GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET INDUSTRIELS**

**« OPTIMISATION DE FABRICATION  
DE L'ETHANOL A PARTIR DE LA  
FARINE DE MANIOC PAR VOIE  
D'HYDROLYSE ENZYMATIQUE »**

**Présenté par : RANDRIANARIVELO Herilanto Ignace**

**Président : Monsieur ANDRIANARISON Edouard Ravalison**

**Encadreur : Monsieur RAZAFIMANDEFITRA André**

**Examineurs : Madame ELISOAMIADANA Philippine**

**Monsieur RAKOTOARIVONIZAKA Ignace**

**Monsieur RANAIVOSAMOELINA Noëlson**

Soutenu le 01 Février 2022

Promotion 2020



# REMERCIEMENT

En premier lieu, je tiens à remercier le Seigneur tout puissant qui m'a donné du courage, de la force et de la santé, même du temps durant la réalisation de ce travail.

Mes vifs remerciements ainsi que mes profondes reconnaissances sont exprimés envers :

- ❖ **Monsieur RAJAONARISON Eddie Franck**, Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra d'assurer le bon fonctionnement de notre formation durant ces cinq années d'études.
- ❖ **Monsieur RAVONISON Eli Rijatina Hervé**, Chef de la mention Génie Industriel de m'avoir autorisé à la présentation de ce présent mémoire.
- ❖ **Monsieur RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné**, Chef du département Génie des Procédés Chimiques et Industriels (GPCI) qui m'a permis de présenter ce mémoire.
- ❖ **Monsieur ANDRIANARISON Edouard Ravalison**, Professeur au sein de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) de la mention de GPCI, de m'avoir fait le grand honneur de présider le jury de ce mémoire.
- ❖ **Monsieur RAZAFIMANDEFITRA André**, Enseignant chercheur à l'ESPA, pour l'effcience de son encadrement ainsi que pour sa supervision au bon déroulement de nos travaux de mémoire et de me consacrer une grande partie de son temps.
- ❖ **Madame ELISOAMIADANA Philippine**, Maître de conférences et enseignante chercheur au sein de l'ESPA qui, malgré ses nombreuses occupations, a bien voulu de juger ce travail à titre d'examineur.
- ❖ **Monsieur RAKOTOARIVONIZAKA Ignace**, Maître de conférences et enseignant chercheur au sein de l'ESPA qui, malgré ses lourdes taches, a bien voulu de participer au jury de mémoire.
- ❖ **Monsieur RANAIVOSAMOELINA Noëlson**, Assistant et Enseignant chercheur au sein de l'ESPA, pour avoir consacré de son temps d'assoir à ce présent mémoire en qualité d'examineur.
- ❖ **A tous les responsables au laboratoire Génie chimique de l'ESPA**, pour leur aide à la réalisation de certaines parties de ce mémoire.
- ❖ **A tous les enseignants**, qui sont chargés de partager leur savoir et leur connaissance tout au long de ces cinq années d'études.

- ❖ **A toute la famille**, qui m'a soutenu physiquement, moralement et surtout financièrement tout au long de mon étude et même pour la réalisation de ce mémoire.
- ❖ Ainsi que pour **tous mes ami(e)s** et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation du présent mémoire.

*Merci du fond du cœur !*

# SOMMAIRE

INTRODUCTION

PARTIE I. ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I. GENERALITES SUR LE MANIOC

Chapitre II. GENERALITES SUR L'AMIDON

Chapitre III. ETUDE THEORIQUE DE LA FABRICATION DE L'ETHANOL

Chapitre IV. GENERALITES SUR LES BOISSONS ALCOOLISEES

PARTIE II. ETUDES EXPERIMENTALES

Chapitre V. MATERIELS ET METHODES

Chapitre VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CONCLUSION

# GLOSSAIRE

Egrappage	: c'est l'opération de l'enlèvement des grappes dans l'opération de la vinification.
Distillat	: liquide obtenu par condensation de la vapeur recueillie en fin de distillation.
Foulage	: c'est l'opération qui consiste à presser le raisin afin de libérer le jus qu'il contient.
Glucoside	: association de glucides et de substances diverses de nature non glucidique.
Enzyme	: protéines permettant d'accélérer les réactions biochimiques sans se modifier elles-mêmes et sans modifier les composants qui participent à ces réactions.
Hydrolyse	: c'est une décomposition chimique d'une substance par action directe ou indirecte de l'eau, de façon qu'il apparaisse de nouvelles molécules.
organoleptiques	: se dit des propriétés grâce auxquelles les corps agissent sur les organes des sens.
Amylacé	: se dit des corps qui ont la composition de l'amidon.

# LISTE DES UNITES

- % : Pourcent
- °GL : Degré Gay-Lussac : degré alcoolique ou pourcentage volumique en éthanol
- °C : Degré Celsius : unité de mesure de température
- cm : centimètre : unité de mesure de longueur
- g : gramme : unité de mesure de masse
- ha : hectare : unité de mesure de surface
- kg : kilogramme : unité de mesure de masse
- L : litre : unité de mesure de volume
- m : mètre : unité de mesure de longueur
- mm : mètre : unité de mesure de longueur
- mol : Unité de la quantité de matière d'un système en unité du système internationale

# LISTE DES ABREVIATIONS

ADP	: Adénosine diphosphate.
ATP	: Adénosine triphosphate.
CO <sub>2</sub>	: Dioxyde de carbone.
ESPA	: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
FAO	: Food and Agriculture Organisation (organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).
GPCI	: Génie de Procédés Chimiques et Industriels
JIRAMA	: Jiro sy Rano Malagasy.
NAD	: Nicotinamide Adénine Dinucléotide.
pH	: potentiel Hydrogène.
SA	: Société Anonyme.

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Partie souterraine de la plante de manioc.....	5
Figure 2 : Tige de la plante.....	6
Figure 3 : Feuilles du manioc.....	6
Figure 4 : Fleur mâle.....	7
Figure 5 : Fleur femelle.....	7
Figure 6 : Graines et fruits de la plante.....	8
Figure 7 : Utilisations du manioc.....	12
Figure 8 : Transformation et utilisation du manioc en Afrique.....	13
Figure 9 : Formes et tailles des granules d'amidon de manioc.....	15
Figure 10 : Structure d'un grain d'amidon classique.....	16
Figure 11 : Représentation schématique d'un grain d'amidon.....	16
Figure 12 : Structure moléculaire de l'amylose.....	17
Figure 13 : Structure de l'amylopectine.....	18
Figure 14 : Exemple de procédé d'extraction d'amidon.....	19
Figure 15 : Modification de l'amidon par chauffage.....	21
Figure 16 : Fabrication d'éthanol.....	23
Figure 17 : Diagramme de l'hydrolyse acide.....	25
Figure 18 : Mode d'attaque de l' $\alpha$ -amylase.....	27
Figure 19 : Mode d'attaque d glucoamylase.....	27
Figure 20 : Diagramme représentant les produits issus de l'hydrolyse d'amidon.....	30
Figure 21 : Mécanisme de la fermentation.....	31
Figure 22 : Fabrication du vin.....	42
Figure 23 : Fabrication de bière.....	43
Figure 24 : Etapes de la fabrication d'éthanol.....	45
Figure 25 : Procédé d'extraction d'amidon.....	46
Figure 26 : Illustration des opérations effectuées lors d'extraction d'amidon.....	48
Figure 27 : Lavage et trempage de l'orge.....	50
Figure 28 : Diagramme de trempage.....	50
Figure 29 : Germeur contenant de l'orge à germer.....	51
Figure 30 : Malt vert.....	52
Figure 31 : Malt broyé.....	52
Figure 32 : Droite d'étalonnage.....	55

Figure 33 : Dosage de glucose par liqueur de Fehling .....	55
Figure 34 : Gélification d'amidon .....	57
Figure 35 : Solution visqueuse ou amidon gélifié .....	57
Figure 36 : Drêche issue de l'hydrolyse.....	63
Figure 37 : fermentation du moût .....	64
Figure 38 : Distillation.....	65
Figure 39 : Courbe de l'évolution de la densité pour essai B.....	77
Figure 40 : Evolution de la densité de l'essai C.....	78
Figure 41 : Courbe d'évolution de la température pour essai B.....	79
Figure 42 : Courbe d'évolution de la température pour essai C .....	79
Figure 43 : Solution avant et après dosage.....	a

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification systématique du manioc.....	3
Tableau 2 : Noms vernaculaires selon les groupes ethnies à Madagascar.....	4
Tableau 3 : Superficie et productions de riz, de manioc et de maïs au niveau national (1998 à 2001).....	8
Tableau 4 : Composition des tubercules de manioc.....	11
Tableau 5 : Comparaisons des types d'hydrolyses .....	28
Tableau 6 : Conditions optimales d'action des enzymes dégradant l'amidon.....	29
Tableau 7 : Classification systématique de levure.....	32
Tableau 8 : Essai d'hydrolyse acide d'amidon.....	56
Tableau 9 : Variation de la durée de l'hydrolyse en fixant la charge. ....	59
Tableau 10 : Variation de la charge en fixant la durée de l'hydrolyse .....	60
Tableau 11 : Vérification de l'avancement de l'hydrolyse.....	60
Tableau 12 : Variation de la durée en travaillant à 65°C et à la charge de 100g/400ml .....	61
Tableau 13 : Variation de la charge pour l'hydrolyse de la farine brute .....	61
Tableau 14 : Variation de la quantité du malt durant l'hydrolyse de la farine brute .....	62
Tableau 15 : La charge hydrolyse directe de la farine épuisée .....	62
Tableau 16 : Charge d'hydrolyse de la farine épuisée soumise à une nouvelle extraction d'amidon.....	62
Tableau 17 : Compositions initiales du moût.....	64
Tableau 18 : Résultats de l'extraction d'amidon à partir du tubercule fraîche .....	67
Tableau 19 : Résultats de l'extraction d'amidon à partir du tubercule sec.....	68
Tableau 20 : L'humidité de l'amidon à partir du tubercule fraîche .....	69
Tableau 21 : L'humidité du malt issu de la germination après séchage .....	69
Tableau 22 : Evolution de la concentration en glucose durant l'hydrolyse acide d'amidon .....	70
Tableau 23 : Evolution de la concentration en glucose pour la variation de la durée... ..	71
Tableau 24 : Evolution de la concentration en glucose pour la variation de la charge ..	71
Tableau 25 : Evolution de la concentration en glucose lors de la vérification de l'avancement de l'hydrolyse .....	72
Tableau 26 : Evolution de la concentration en glucose pour la variation de la durée en fixant la charge (V=4ma) .....	73

Tableau 27 : Résultats de l'hydrolyse de la farine brute en variant la charge.....	74
Tableau 28 : Résultats de l'hydrolyse de la farine en utilisant des différentes quantités de malt .....	75
Tableau 29 : Evolution de la concentration en glucose de l'hydrolyse de la farine épuisée .....	75
Tableau 30 : Résultats de l'hydrolyse de la farine épuisée en procédant une autre extraction d'amidon .....	76
Tableau 31 : Evolution de la densité de l'essai B .....	76
Tableau 32 : Evolution de la densité de l'essai C .....	77
Tableau 33 : Température de l'essai B.....	78
Tableau 34 : Température de l'essai C.....	79
Tableau 35 : Résultats de la distillation .....	80
Tableau 36 : Table donnant le degré alcoométrique en fonction de la densité .....	b

# INTRODUCTION

La quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a connu une hausse vertigineuse. L'utilisation des énergies fossiles et des énergies non renouvelables est le plus grand facteur de l'augmentation de cette quantité, surtout le gaz carbonique CO<sub>2</sub> et ce gaz entraîne le réchauffement climatique qui est devenu l'un des problèmes majeurs de ce siècle. Les scientifiques inventent jusqu'à maintenant la chimie verte pour remplacer les énergies fossiles et non renouvelables car les réserves mondiales restantes sont limitées et vont bientôt arriver à leur terme.

De plus, Madagascar offre un atout non négligeable pour les produits agricoles par sa surface et diversité de ses produits, y concernant les productions de manioc. Mais la valorisation de nos ressources est insuffisante. Du fait de la disponibilité pendant toute l'année, de la production abondante et de la teneur élevé d'amidon du manioc, sa transformation en éthanol est l'une de valorisation appropriée qui peuvent être utilisées dans le domaine énergétique, industriel, pharmaceutique,... La mise en place de l'unité de transformation constitue une source de revenus pour les paysans et un atout déterminant pour le développement sociaux-économique de notre pays.

C'est pour cette raison que nous avons choisi comme thème de mémoire intitulé: « Optimisation de fabrication de l'éthanol à partir de la farine de manioc par voie d'hydrolyse enzymatique ». Notre objectif est de produire de l'éthanol à partir de matières amylacées qui sont le manioc.

Notre étude comporte deux parties distinctes :

- La première partie concerne l'étude bibliographique : généralités sur le manioc, généralités sur l'amidon, ainsi que sur l'étude théorique de la fabrication de l'éthanol et généralités sur les boissons alcoolisées.
- La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale concernant les différentes transformations appliquées au manioc jusqu'à l'obtention de l'éthanol, en parlant les matériels et méthodes utilisés, ainsi que les résultats obtenus et leurs discussions.

# PARTIE I. ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

# Chapitre I. GENERALITES SUR LE MANIOC

## I.1. Historiques et origine du manioc [1] [2] [3]

Le manioc (*Manihot Esculenta*) est originaire de la région septentrionale de l'Amérique du sud, où elle donnait déjà lieu à un commerce très actif dès l'Antiquité. En effet, le manioc a été introduit en Afrique par les colons portugais vers le milieu du XVI<sup>ème</sup> siècle au Bénin. Sa culture n'aurait progressé que lentement dans l'actuelle République du Congo, en Angola et en Guinée.

Dans l'Océan Indien, le manioc a été introduit à Bourbon et à l'île de la Réunion respectivement en 1738 et en 1739. De là, il passera à Madagascar où on le trouve cultivé dans les régions des hauts plateaux de l'Imerina central en 1875. Il semble que l'introduction du manioc dans les pays de l'Afrique de l'Est ait été également faite à partir de l'Océan Indien.

Sa culture et sa consommation ne s'y sont développées qu'à partir du siècle dernier. Depuis, son extension ne cesse de s'affirmer. C'est à la fois un aliment d'appoint et de sécurité dans les régions sub-sahariennes, et la base de l'alimentation dans les zones rurale et forestière.

## I.2. Position systématique de la plante [1] [4] [5]

La classification systématique de la plante est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Classification systématique du manioc

Règne	PLANTAE
Sous règne	PHANEROGAMES
Embranchement	ANGIOSPERMES
Classe	DICOTYLEDONES
Ordre	EUPHORBIALES
Famille	EUPHORBIACEAE
Genre	<i>Manihot</i>
Espèce	<i>Manihot esculenta</i>

(Source : ANDRIAMANANTSOA et RANOVONA)

La plante est connue sous le nom très divers, selon les pays, comme exemple :

- En Amérique de langue espagnol : manioca, rumu ou yuca
- Au Brésil : manioca ou aipun
- En Afrique francophone et à Madagascar : manioc
- En Afrique anglophone (Thaïlande, Sri Lanka) : cassava ou cossado
- En Inde et Malaisie : tapioca

À Madagascar, le manioc a plusieurs noms vernaculaires selon les groupes ethniques :

Tableau 2 : Noms vernaculaires selon les groupes ethniques à Madagascar

<b>Groupes ethniques</b>	<b>Noms vernaculaires</b>
Merina	<i>mangahazo</i>
Bara et Antandroy	<i>balahazo</i>
Betsileo	<i>kazaha</i>
Sakalava	<i>mahogo</i>

(Source : ANDRIANANTENAINA)

### **I.3. Description botanique de la plante [2] [6] [7]**

Le manioc est une plante arbustive, semi-ligneuse, atteignant en culture 1 à 6 m de hauteur. Elle est pluriannuelle, mais généralement cultivée comme une plante annuelle et bisannuelle. Comme toutes les Euphorbiacées, ses diverses parties contiennent du latex.

#### **I.3.1. Racines**

Dans cette plante, les racines sont les parties très utiles. Elles sont fasciculées et se renflent en se gorgeant d'amidon. La plante forme une centaine de racine mais quelques-unes seulement se tubérisent. Les tubercules peuvent atteindre 20 à 80 cm de long et de 5 à 15 cm de diamètre et qui sont attachés au collet de la plante par un pédoncule plus ou moins long, parfois inexistant. Ils se situent à quelques centimètres de la surface du sol.

Dans une coupe transversale d'un tubercule de manioc, on y trouve :

- Une écorce externe de couleur grise violacée, jaunâtre ou brune formée de liège.

- Une écorce interne de 2 à 10 mm d'épaisseur, le "phelloderme", de couleur blanche ou rose plus ou moins violacée, pauvre en fécule et riche en produit toxique, la "manihotoxine".
- Un cylindre central blanc ou jaune clair riche en fécule (85 à 92%). Les tubercules ont des formes très variables et pèsent de 100 g à 3 Kg chacun. Un pied de manioc peut produire 5 à 6 Kg de tubercules et parfois plus.

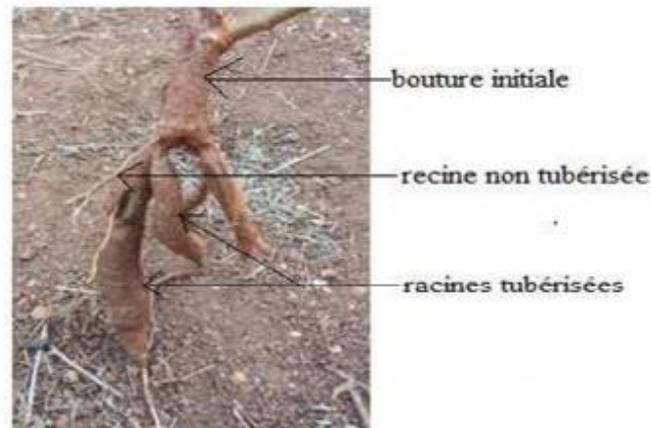


Figure 1 : Partie souterraine de la plante de manioc (source : YOUSOUF)

### **I.3.2. Tiges**

Le manioc peut se présenter avec une ou plusieurs tiges, plus ou moins verticales et atteignant 1 à 6 m de hauteur et 2 à 4 cm de diamètre en moyenne. Elles sont de couleur variée : blanc verdâtre, gris, jaunâtre, violacé, rouge, brun,... A une certaine hauteur, ces tiges peuvent se ramifier en 2 ou 3 branches, qui à leur tour peuvent se ramifier jusqu'à dix fois au cours du cycle. Cette ramification provoquée par la floraison, est sous contrôle variétal. La tige porte également de nombreux nœuds portant chacun un œil protégé par le pétiole de la feuille.



Figure 2 : Tige de la plante (source : Auteur)

### **I.3.3. Feuilles**

Elles sont caduques, car elles tombent durant la phase de repos du manioc, alternes et palmilobées : 3 à 11 lobes. Les feuilles mesurent de 10 à 20 cm de long et sont portées par un pétiole qui peut être réduit à quelques millimètres ou qui peut atteindre 6 cm de long et dont la couleur va du jaune clair au rouge en passant par le vert.



Figure 3 : Feuilles du manioc (source : Auteur)

### **I.3.4. Inflorescences**

Elles apparaissent aux points où les tiges et les branches se ramifient. Ce sont des grappes qui comprennent en général 80 à 120 fleurs mâles et 4 à 10 fleurs femelles. De ce fait, on peut dire que le manioc est une plante dicline-monoïque : les étamines et l'ovaire sont sur des fleurs différentes mais portées par le même plant.

### **I.3.5. Fleurs**

Le diamètre des fleurs de la plante est environ 1 cm et la couleur de ces fleurs est généralement jaunâtre.

Les fleurs mâles sont portées par des pédicelles minces, de 5 mm de long. Elles comprennent un calice de 5 sépales soudés à la base qui est formé de lobes triangulaires, subaigus, glabres de 6 mm de long sur 4 mm de large et 10 étamines.



Figure 4 : Fleur mâle [2]

Les fleurs femelles sont portées par des pédicelles de 7 mm de long, incurvées, font jusqu'à 2,5 cm de diamètre. Elles comprennent un calice de 5 sépales libres, un ovaire divisé en 3 loges et surmonté d'un style portant un stigmate divisé en 3 parties portant de nombreuses protubérances.



Figure 5 : Fleur femelle [2]

Les fleurs mâles et les fleurs femelles ne s'ouvrent pas en même temps, la fécondation est donc croisée, de plus les fleurs mâles ne sont pas toujours fertiles.

### **I.3.6. Fruits**

Ce sont des capsules déhiscentes. Elles mûrissent en 5 mois et projettent les graines à 10 m environ. Elles sont de la même couleur que les rameaux et comportent à leur surface externe 6 ailes plus ou moins sinueuses. Elles renferment 3 loges contenant chacune une graine.

### I.3.7. Graines

Les graines sont ellipsoïdes à pentagonales déprimées, de 5 à 13 mm de long sur 3 à 7 mm de large et 3,5 mm d'épaisseur. Elles ont une testa un peu brillante, gris pâle, parfois tachetée de noir. A la base, on trouve un renflement ou "caroncule " de 3mm de large à l'extrémité. Les graines sont oléagineuses. Elles mettent plusieurs mois à germer.



Figure 6 : Graines et fruits de la plante [2]

### I.4. Répartition de la productivité du manioc [4]

A Madagascar, le manioc est planté dans presque toutes les régions de la grande île. Le manioc occupe 3500000 ha de la surface cultivée, avec un rendement de 4 à 7 t/ha en fonction des techniques culturales et du milieu d'implantation.

L'évolution de superficies cultivées et de la production de manioc par rapport à d'autres principales cultures vivrières tel que le riz et le maïs au niveau national de 1998 à 2001 est présentée dans le tableau 3.

Tableau 3 : Superficie et productions de riz, de manioc et de maïs au niveau national (1998 à 2001)

Culture		1998	1999	2000	2001
Riz	Superficie (ha)	1 203 000	1 207 500	1 209 300	1 212 650
	Production (t)	2 447 210	2 570 000	2 480 470	2 662 465
Manioc	Superficie (ha)	360 000	351 600	351 730	351 985
	Production (t)	2 432 000	2 461 000	2 463 360	2 509 740
Maïs	Superficie (ha)	186 000	191 000	192 135	193 270
	Production (t)	155 000	170 172	169 800	179 550

(Source : ANDRIAMANANTSOA)

Le manioc prend la deuxième place après le riz du point de vue tonnages et superficies en 1998 – 2001. D'autre part, le milieu de culture du manioc décroît par rapport à celle du riz et du maïs qui augmente.

### **I.5. Ecologie de la plante [8] [9]**

Le manioc est une plante de la zone tropicale qui s'adapte aux climats les plus variés et aux sols les plus divers (à l'exclusion des sols hydromorphes).

#### **I.5.1. Température**

Les températures moyennes les plus favorables à la croissance se situent entre 23°C et 25°C. La croissance est arrêtée à des températures inférieures à 10°C et très ralentie à 40°C.

#### **I.5.2. Eclairage**

Le manioc est une plante héliophile. Une réduction de l'éclairage de moitié entraîne une diminution de 30% de la matière sèche produite allant vers les racines. Le manioc est en outre considéré comme une plante de jours courts.

#### **I.5.3. Régime hydrique**

Le manioc est considéré d'une façon générale comme une plante tolérante à la sécheresse. Une pluviométrie moyenne comprise entre 1000 et 2000 mm est généralement satisfaisante. Les sols engorgés d'eau provoquent des pourritures des racines et un ralentissement de la croissance.

#### **I.5.4. Facteurs édaphiques**

Dans de bonnes conditions de température et d'humidité, le manioc peut être cultivé sur des sols extrêmement variés : alluvionnaires récents, ferrallitiques ou tourbeux. Il supporte mal les sols hydromorphes.

Les meilleurs sols sont en général les sols profonds à bonne réserve en eau, bien drainés, de texture sablo-limoneuse ou argilo-sableuse, à structure stable, à pH 5,5.

### **I.6. Phases végétatives de la plante de manioc [6]**

Le manioc se multiplie par boutures et son cycle végétatif varie de 6 à 24 mois et plus selon les conditions climatiques ou d'altitude.

#### **I.6.1. Phase de reprise**

Cinq jours après sa mise en terre, la bouture émet ses premières racines puis des minuscules feuilles plissées apparaissent. Cette phase dure 15 jours.

### **I.6.2. Phase d'installation**

Les jeunes racines s'allongent et les premières tiges apparaissent. Cette phase dure une quinzaine de jours mais peut se prolonger durant un mois et parfois plus.

### **I.6.3. Phase de développement foliaire**

Les tiges se développent, se ramifient et les feuilles apparaissent. La surface foliaire atteint son maximum en 3 mois. Cette phase dure 4 mois environ, c'est à dire jusqu'à la fin de la saison des pluies. Quelques racines commencent à se tubériser.

### **I.6.4. Phase d'accumulation des réserves**

L'accumulation des réserves d'amidon dans un nombre variable de racines (tubérisation) a lieu dès les premières semaines, mais ne devient visible à l'œil qu'à partir du 2ème mois et continue au rythme des conditions du milieu.

### **I.6.5. Phase de repos**

En altitude et en zone à saison sèche prolongée, le manioc perd complètement ses feuilles et le bois prend sa teinte définitive. Cette phase dure 1 à 2 mois. Le manioc n'entre jamais complètement en repos en zone humide (saison sèche courte ou peu accusée).

### **I.6.6. Seconde phase de développement foliaire**

Pour des cycles culturaux de plus d'un an, les yeux terminaux donnent des pousses et la plante se couvre rapidement de feuilles. Cette phase dure 5 mois.

### **I.6.7. Seconde phase d'accumulation des réserves**

La fécule s'accumule à nouveau dans les racines qui prennent leur taille définitive en 7 mois environ.

### **I.6.8. Seconde phase de repos**

Le manioc perd à nouveau ses feuilles et on le récolte.

## **I.7. Répartition géographique [10]**

Le manioc est une plante de la zone tropicale humide. Il s'adapte facilement à la plupart des conditions de climat et de sol à l'exception des climats des zones tempérées européennes très froides et des zones désertiques du sahel par exemple.

## **I.8. Principaux constituants chimiques [4] [11]**

La maturité, la variété et les modes de cultures influencent la composition chimique du manioc. Les tubercules de manioc renferment de l'amidon à une teneur élevée et une

faible teneur en protéine et en lipide ainsi qu'en éléments minéraux. Par ailleurs une concentration d'acide cyanhydrique considérable est présente dans le tubercule.

Une estimation sur les composants des tubercules de manioc est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Composition des tubercules de manioc

Composant	Tubercules (matière fraîche en %)	Matière sèche (en %)
Eau	66,2	0,009
Amidon	27,5	81,5
Saccharose	1,0	3,0
Glucose	0,4	1,1
Fructose	0,3	0,8
Protéines	0,4	1,3
Matières grasses	0,2	0,6
Eléments minéraux	0,8	2,5
HCN (ppm)	150-300	300-900

(Source : ASIÉDU)

### **I.9. Diverses utilisations de la plante [9] [12] [13]**

Depuis longtemps, les maniocs sont utilisés dans différentes domaines qui sont présentés dans la figure 7.

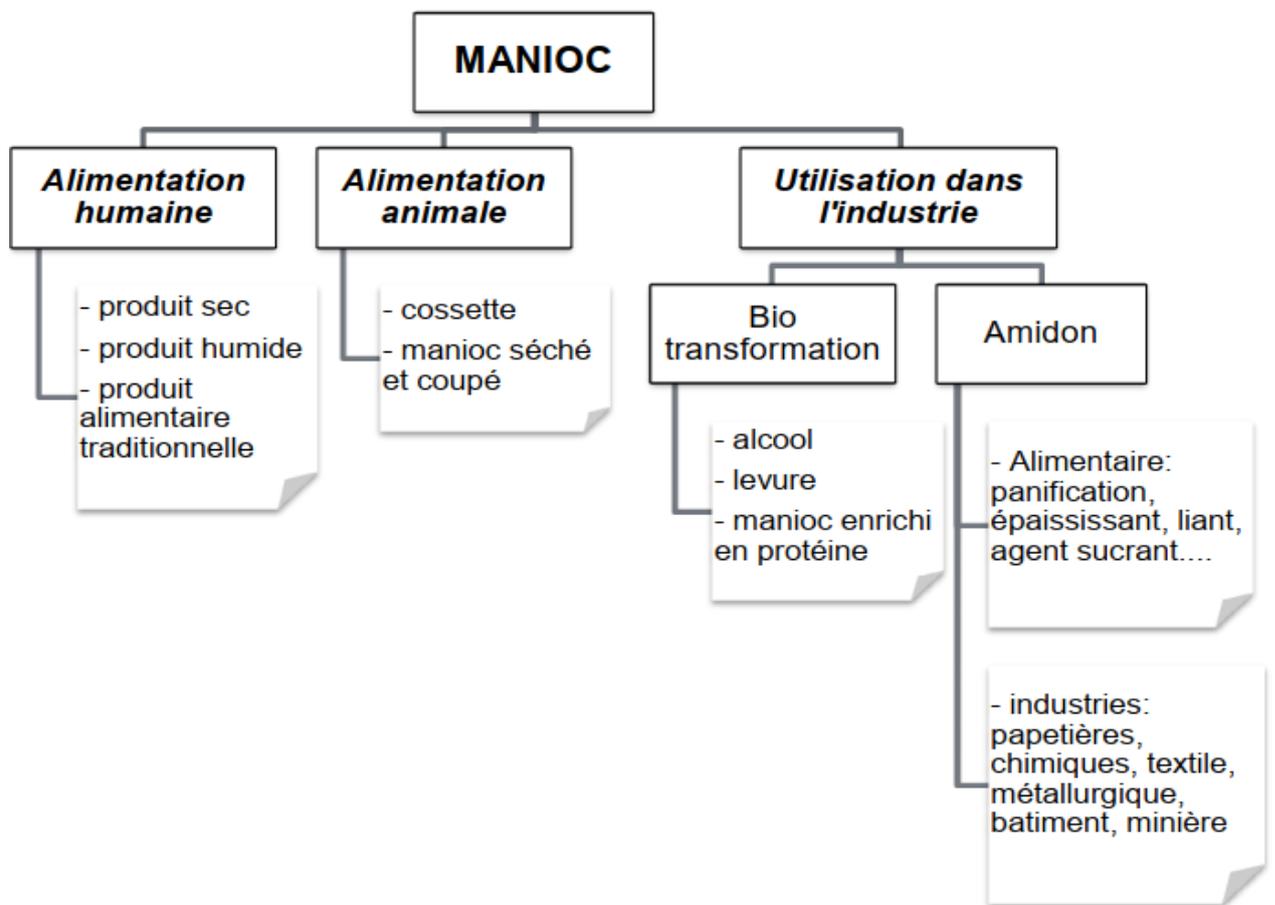


Figure 7 : Utilisations du manioc (source : RANDRIAMANGA)

### I.9.1. Alimentation humaine

Les jeunes feuilles de manioc sont régulièrement cueillies et préparées pour la consommation humaine dans certains pays Africains (Cameroun, République démocratique du Congo, Libéria,...), où elles constituent un apport intéressant en protéines, une source appréciable de fer, de calcium et de vitamines A et C.

La préparation des feuilles de manioc commence par la séparation des pétioles durs, puis le broyage au mortier des feuilles et des jeunes pétioles, suivi de la cuisson à ébullition de la pâte pendant certains temps. Le but c'est d'éliminer les substances cyanogénétiques et de rendre les feuilles consommables sans risque. A Madagascar, le produit obtenu par cette préparation est appelé «ravintoto ».

Les racines tubéreuses sont transformées et utilisées en alimentation humaine. Ces racines sont consommées à l'état frais ou sec.

Les racines de manioc sont hautement périssables et doivent être préparées dans les quelques jours suivant la récolte. Au Brésil, les racines fraîches sont râpées, puis

pressées pour l'élimination du liquide où se concentre l'essentiel de cyanure contenu dans la racine. La pâte semi-humide est alors chauffée pour produire la *farinha*, une farine grossière qui sera étalée sur de nombreuses préparations culinaires brésiliennes.

En Afrique, la pâte obtenue par râpage est d'abord fermentée avant d'être rôtie sur une plaque chaude pour produire une sorte de semoule appelée *gari*, ou bien elle est séchée au soleil et moulue, la farine obtenue étant mêlée à de l'eau pour obtenir une pâte consistante appelée *foufou*.

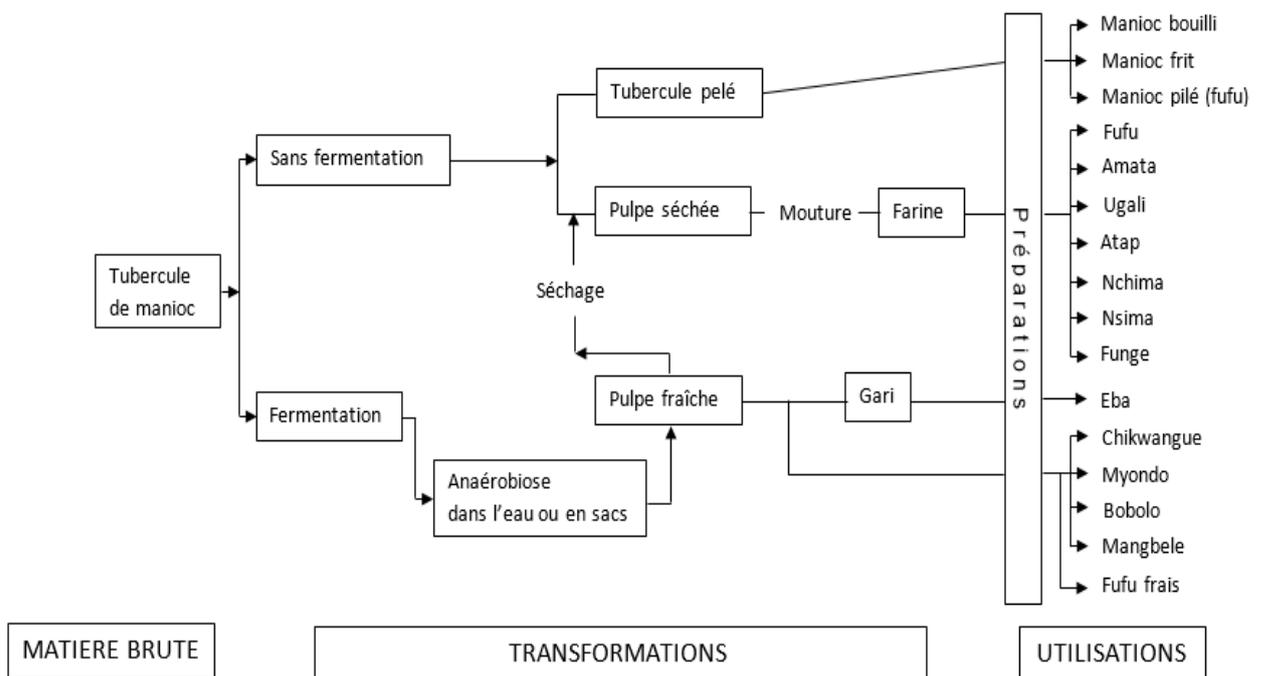


Figure 8 : Transformation et utilisation du manioc en Afrique (source : Komi EGLE)

### I.9.2. Alimentation animale

Tant les racines tubéreuses que les feuilles des plantes de manioc peuvent être utilisés pour nourrir les animaux de la ferme, ou comme matières premières pour la production industrielle d'aliments du bétail. Cependant, en raison de leur teneur en cyanure, les racines tubéreuses et feuillages frais ne peuvent être donnés aux animaux qu'en quantités très limitées. Les racines fraîches sont débitées en copeaux ou en tranches, tandis que les feuilles sont hachées menu. Avant d'être distribués aux animaux, les fourrages de manioc sont étalés par terre durant une nuit pour laisser l'évaporation d'une partie du cyanure. Les racines sont utilisées à l'état frais (cruës ou cuites) ou à l'état sec (cossettes, granulés, farines). Elles peuvent également être utilisées en ensilage dans le cas d'approvisionnement irrégulier.

### **I.9.3. Utilisations industrielles**

Pour les Thaïlande et la Chine, les tubercules sont utilisés pour extraire de l'amidon qui subit des transformations supplémentaires pour obtenir des produits alimentaires ou servent de matières premières pour la production d'édulcorants, de fructose, de l'alcool (éthanol) et de monoglutamate de sodium. Il peut être aussi utilisé dans la fabrication de contreplaqué, de papier et de produits textiles.

Ce qui concerne la production de l'éthanol, l'amidon obtenu est additionné avec de l'eau qui va être chauffé pour son gélifié puis passe par une opération appelé hydrolyse pour avoir une solution sucrée. La fermentation de la solution sucrée obtenu permette d'avoir de l'alcool/eau. Pour finir la distillation est la dernière étape de la production de l'éthanol.

## Chapitre II. GENERALITES SUR L'AMIDON

### II.1. Définitions [14] [15]

L'amidon est un hydrate de carbone se présentant sous forme d'une poudre blanche, insoluble dans l'eau froide ou tiède mais fermentescible. L'amidon est un polysaccharide constituant la principale forme sous laquelle les plantes accumulent des réserves énergétiques. Il représente une fraction pondérale importante dans des nombreuses matières agricoles, telles que les céréales (représentent 30 à 80% de la matière sèche) et les tubercules. L'amidon est un mélange de deux polysaccharides: l'amylose molécule linéaire et l'amylopectine molécule ramifié. Il se présente sous la formule générale  $(C_6H_{10}O_5)_n$ .

### II.2. Structures d'amidon

#### II.2.1. Structures physiques [14] [15]

Les granules d'amidon sont des particules blanches semi-cristallines, insolubles dans l'eau à température ambiante et dont la taille varie entre 2 et 100  $\mu\text{m}$ . L'analyse par diffraction au rayon X montre que l'amidon est un polymère semi-cristallin.

La structure des grains d'amidon est formée de couches concentriques alternativement claires et sombres, entourant un centre plus foncé appelé « hile », qui est le centre initial de croissance du grain. La taille, la forme et la structure de ces graines sont variables avec la plante dont provient l'amidon. Il n'existe donc pas un seul mais plusieurs amidons ayant des propriétés voisines, mais légèrement différentes selon leur origine. Les grains d'amidon sont sphéroïdes.

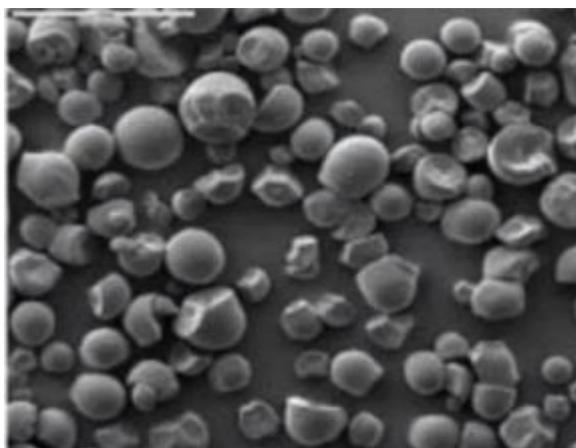


Figure 9 : Formes et tailles des granules d'amidon de manioc (source : RAKOTOMAHEFA)

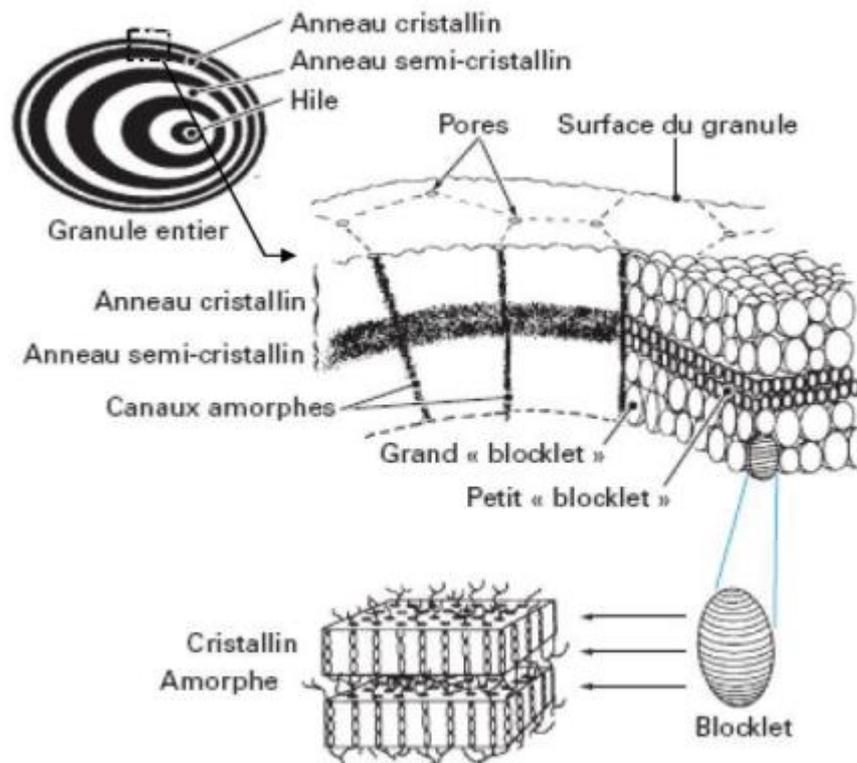


Figure 10 : Structure d'un grain d'amidon classique (source : BAHRANI)

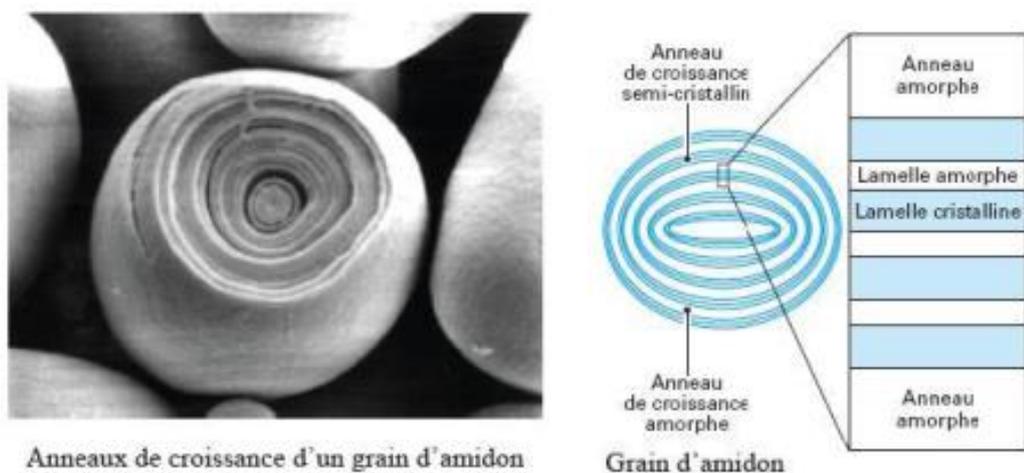


Figure 11 : Représentation schématique d'un grain d'amidon (source : RAKOTOMAHEFA)

## II.2.2. Structures chimiques [14] [15] [16] [17] [18]

Du point de vue chimique, l'amidon est un polymère constitué uniquement de molécules de D- glucose. Les unités de glucose sont reliées entre elles par des liaisons  $\alpha$  (1-4) et par 4 à 5% des liaisons  $\beta$  (1-6).

L'amidon possède une structure physique organisée en zone amorphe et cristalline, due à l'association intermoléculaire des deux principaux constituants qui sont l'amylose (environ 20% à 30%) et l'amylopectine (environ 70% à 80%).

### II.2.2.1. L'amylose

L'amylose est un polymère linéaire de structure hélicoïdale formé de molécules d'anhydro D-glucose liées par des liaisons de type  $\alpha$  (1,4). Elle représente 20 à 30 % de la molécule d'amidon. Son degré de polymérisation est compris entre 500 et 1000 unités glucoses. Une extrémité de la chaîne porte le groupement pseudo-aldéhyde réducteur, l'autre, un résidu sans groupement réducteur.

La masse molaire de l'amylose est généralement comprise entre  $2 \cdot 10^5$  et  $2 \cdot 10^6$  g/mol et dépend de l'origine botanique.

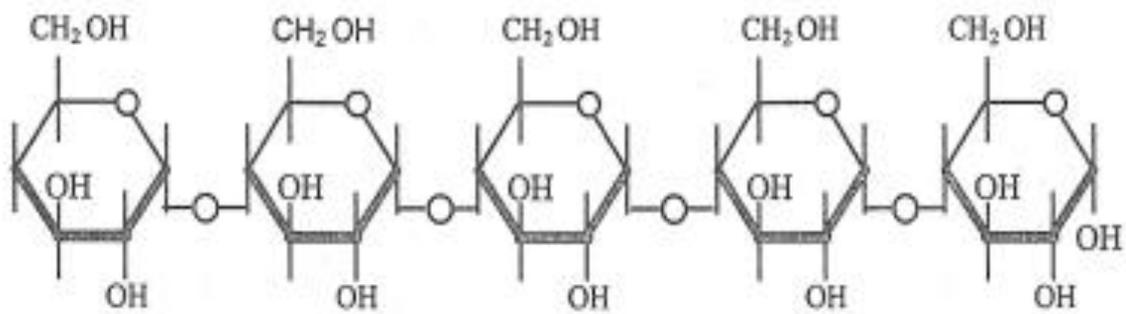
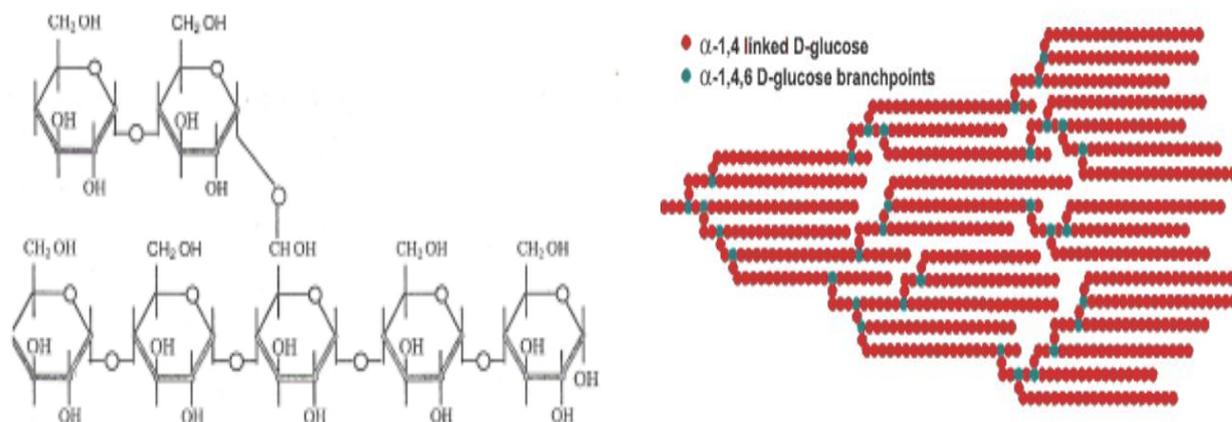


Figure 12 : Structure moléculaire de l'amylose (source : ANTUYA)

### II.2.2.2. L'amylopectine

L'amylopectine est le principal constituant glucidique de l'amidon. Il s'agit d'une molécule ramifiée dans laquelle les unités D-glucose sont principalement reliées par des liaisons de type  $\alpha$  (1-4) et de quelques liaisons  $\alpha$  (1-6) qui représente environ 5 à 6% du nombre total de liaisons et donnent les ramifications. Son degré de polymérisation est au moins égal à 40000 unités glucose.

La masse moléculaire moyenne de l'amylopectine est assez élevée, les valeurs les plus souvent citées dans la littérature se situent entre 107-108 g/mol selon l'origine botanique.



### II.3. Caractéristiques de l'amidon des tubercules de manioc [14]

Le manioc est caractérisé par sa haute teneur en amidon et sa teneur élevée en humidité jusqu'à 16%, en fonction de la manière dont il est traité et stocké.

L'amidon contient de petites quantités de protéines, de minéraux, de fibres et de graisses alimentaires.

L'amidon de manioc se transforme en un état gélatineux relativement rapide lors de la cuisson à l'eau, et reste relativement fluide après refroidissement. Cette caractéristique le rend attractif pour une utilisation dans le secteur industriel. L'amidon de manioc est connu pour sa viscosité, ceci le rend approprié pour des applications industrielles.

### II.4. Procédé d'extraction d'amidon [19]

L'amidon de manioc se trouve dans les cellules de tubercules avec tous les autres constituants du protoplasme tels que la protéine, l'hydrate de carbone soluble.

La technologie d'extraction de l'amidon est un ensemble des opérations unitaires. Ces opérations doivent être réalisées les plus rapidement possibles car il est possible de se produire immédiatement plusieurs réactions diastasiques après récolte et pendant ces différentes opérations.

Le procédé d'extraction est présenté dans la figure 14 (exemple d'extraction de l'amidon dans le tubercule de manioc).

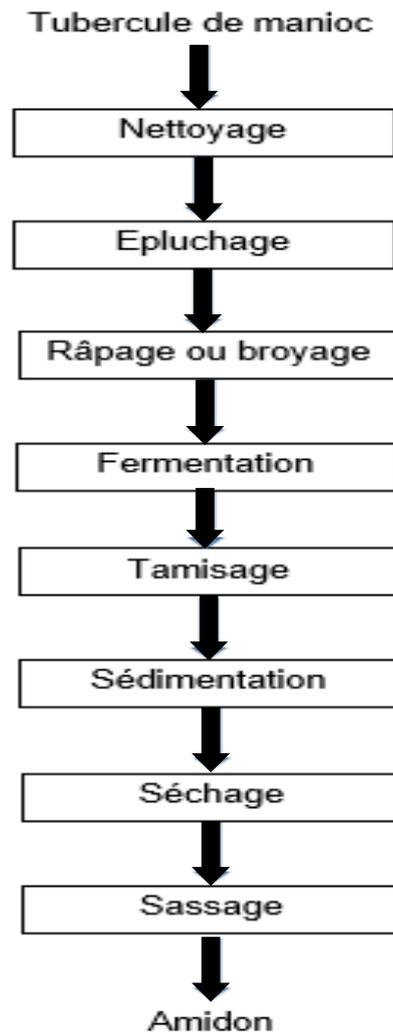


Figure 14 : Exemple de procédé d'extraction d'amidon (source : RAKOTOSAONA et ANDRIANONINTSOA)

#### **II.4.1. Nettoyage**

Les tubercules de manioc sont nettoyés après récolte, pour éliminer les impuretés ou les souillures adhérentes. Cette étape permet de débarrasser facilement l'écorce externe du manioc (couche fine) en frottant les tubercules dans l'eau de lavage.

#### **II.4.2. Epluchage**

Cette étape consiste à éliminer l'écorce interne du tubercule de manioc. Cette couche est indésirable car elle ne renferme que très peu d'amidon et la plus grande partie du glucoside cyanogénétique du manioc se trouve dedans.

### **II.4.3. Râpage ou broyage**

Le but de ces étapes est de briser toutes les enveloppes des cellules pour libérer les grains d'amidon. Cette étape facilite le contact entre le linamarine et le linamarase, ce qui permet de détoxifier le manioc.

Dans les petites fabriques, le râpage par travail manuel avec de tôle perforé est le plus pratique. Mais si on cherche de la quantité de production, on doit utiliser un broyeur mécanique. On doit tenir compte que plus la pulpe est très fine plus l'amidon libéré est important.

### **II.4.4. Fermentation**

On fermente la pulpe râpée ou broyée pendant 3 à 6 jours pour sa détoxification. Ce délai est suffisant pour hydrolyser le glucoside contenu dans le manioc.

Au cours de cette opération, les bactéries lactiques se développent dans ce milieu et produisent différents acide organiques. Il y a ainsi une diminution du pH (à cause de la formation des acides organiques) qui favorise la réaction d'hydrolyse.

### **II.4.5. Tamisage**

Cette opération a pour but d'obtenir de lait d'amidon. Pour cela, la pulpe fermentée doit être mélangée avec une grande quantité d'eau, en les remuant vigoureusement pour extraire l'amidon. On obtient ainsi un liquide hétérogène dans lequel les pulpes se trouvent en suspension. Mais le lait féculent est récupéré en le faisant passer sur un tamis. La pulpe en suspension qui reste sur le tamis et qui contienne encore très peu d'amidon, doit être rincée par un excès d'eau.

Il faut noter bien que les résidus de cette opération contiennent encore une quantité appréciable d'amidon, et peuvent être servi comme aliment de bétail.

### **II.4.6. Sédimentation**

La sédimentation comprend l'ensemble des opérations destinées à séparer la fécule pure et les corps étrangers solubles ou non.

Le lait féculent recueilli dans l'opération tamisage est laissé au repos pour se décanter pendant une nuit (environ 12 heures). On peut ajouter des adjuvants comme l'anhydride sulfureux ou le sulfate d'alumine ou eau de chlore pour limiter l'action des microorganismes et faciliter la sédimentation.

Le liquide surnageant est évacué après décantation d'amidon et on gratte les impuretés déposées en surface. Un autre lavage est nécessaire pour avoir une bonne qualité et propreté d'amidon.

Cette étape peut être aussi remplacée par une opération de centrifugation. Elle présente plusieurs avantages comme un gain de temps (la durée de l'opération diminue).

#### II.4.7. Séchage

L'amidon obtenu doit être réduit en petits morceaux avant de le faire sécher. Le séchage se fait par évaporation, soit à l'aire libre (au soleil) soit dans un four. L'opération doit être arrêtée quand la teneur en eau se situe aux environs de 12%.

#### II.4.8. Sassage

Le terme désigne la pulvérisation du fragment d'amidon dur et le tamisage fin à sec. Après ces deux opérations, on conserve l'amidon dans un endroit sec.

### II.5. Modification par chauffage de l'amidon ou gélification [15] [17] [19] [20]

L'amidon est semi-cristallin. Il est pratiquement insoluble dans l'eau froide. Mais par chauffage à une température plus ou moins élevée, il devient amorphe et miscible à l'eau à toute proportion et il conduit à l'obtention d'une solution visqueuse qui est appelée amidon gélifié. L'amidon ainsi gélifié est facilement attaqué par les enzymes amylolytiques.

Le changement des grains d'amidon lors du chauffage est représenté dans la figure suivante :

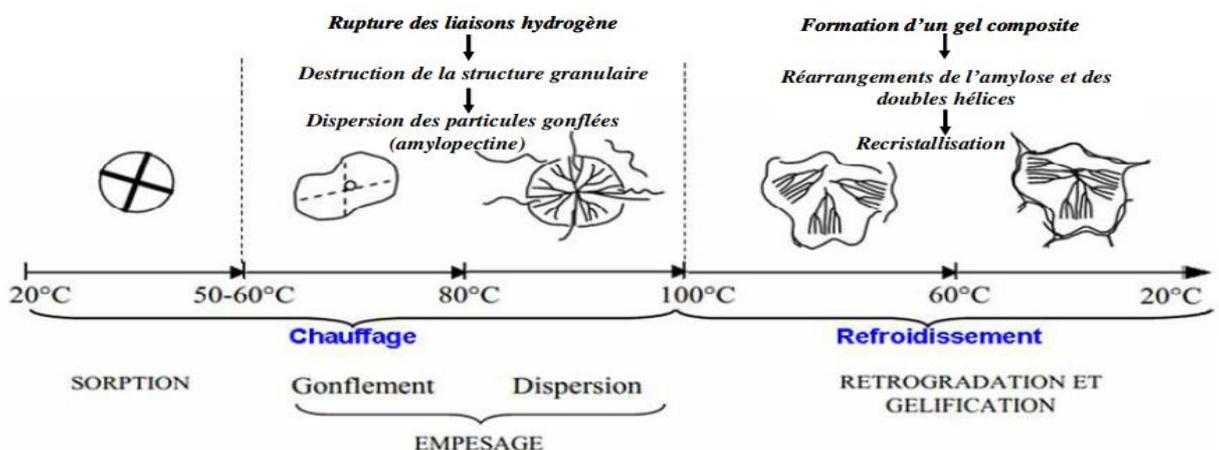


Figure 15 : Modification de l'amidon par chauffage (source : BEN HAJ)

À température ambiante, à saturation, l'amidon peut retenir par sorption environ 40% de matière sèche. Au-delà de 55 – 60 °C, en présence d'un excès d'eau, apparaît le phénomène irréversible de l'empesage ou gélatinisation dû à la rupture des liaisons hydrogène inter-chaîne. Quand la température continue de s'élever, la viscosité du milieu se développe, le grain perd sa structure et les molécules d'amylose et d'amylopectine passent en solution colloïdale.

Au cours du refroidissement, il y a formation d'un gel (gélification) puis recristallisation partielle du réseau macromoléculaire (rétrogradation).

## **II.6. Usage industrielle de l'amidon [21]**

L'utilisation de l'amidon comme une matière première est très important dans l'industrie agro-alimentaire. En effet, ses propriétés rhéologiques, son pouvoir liant, floculant et dispersant sont utilisées dans différentes industries pour la fabrication de tissus, colles et adhésifs, du papier carton ou comme excipient ou agglomérant dans l'industrie pharmaceutique. La modification des propriétés physico-chimiques permet de fabriquer des pâtes alimentaires, des farines instantanées, et de divers produits diététiques.

# Chapitre III. ETUDE THEORIQUE DE LA FABRICATION DE L'ETHANOL

## III.1. DIAGRAMME DE PROCEDE DE FABRICATION D'ETHANOL [14] [19]

Le procédé de fabrication d'éthanol est schématisé dans la figure ci-dessous.

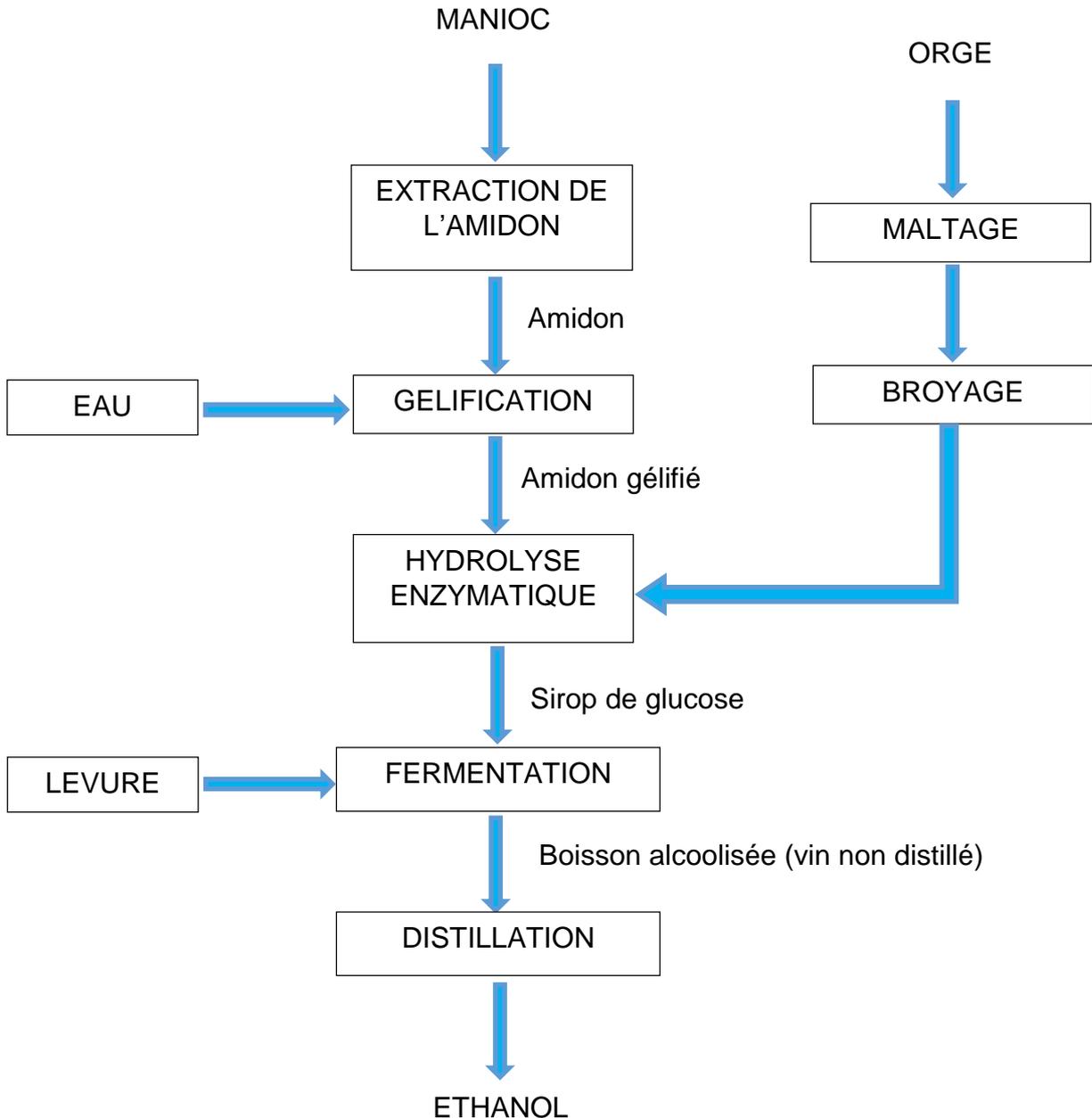


Figure 16 : Fabrication d'éthanol (source : RAKOTOMAHEFA, RAKOTOSAONA et ANDRIANONINTSOA)

## III.2. HYDROLYSE [22]

La gélatinisation des granulés d'amidon (par la température) est indispensable pour permettre l'action des agents d'hydrolyse. Ce traitement hydrothermique provoque le gonflement des granulés qui se poursuit jusqu'à éclatement puis dispersion complète des molécules.

### III.2.1. Définitions [14] [19] [22]

L'hydrolyse est une réaction chimique au cours de laquelle une molécule d'eau est utilisée pour permettre la rupture d'une liaison covalente en se dissociant en  $\text{OH}^-$  et  $\text{H}^+$ .

L'hydrolyse consiste à fragmenter la macromolécule d'amidon pour obtenir des assemblages de petites tailles. Dans ce cas, le polymère se dégrade en matières sucrées fermentescibles comme le glucose, le maltose,...ou/et en matières non sucrées comme la dextrine et le maltodextrine. Le but de cette étape, c'est d'obtenir des monomères, principalement des glucoses et la température nécessaire varie selon l'origine de l'amidon.

### III.2.2. Types d'hydrolyse [19] [23]

Il existe trois grands types de conversion de l'amidon en sucre fermentescible :

- hydrolyse acide
- hydrolyse enzymatique
- hydrolyse acido-enzymatique

#### III.2.2.1. Hydrolyse acide [24]

La suspension d'amidon est soumise à l'action d'un acide ( $\text{HCl}$  ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), de la température et de la pression. Les coupures des chaînes d'amidon se font au hasard, d'où une action liquéfiant entraînant une diminution brutale de la viscosité. Toutefois, il y a risque de cristallisation du dextrose. La séquence de l'opération est détaillée par la figure 17.

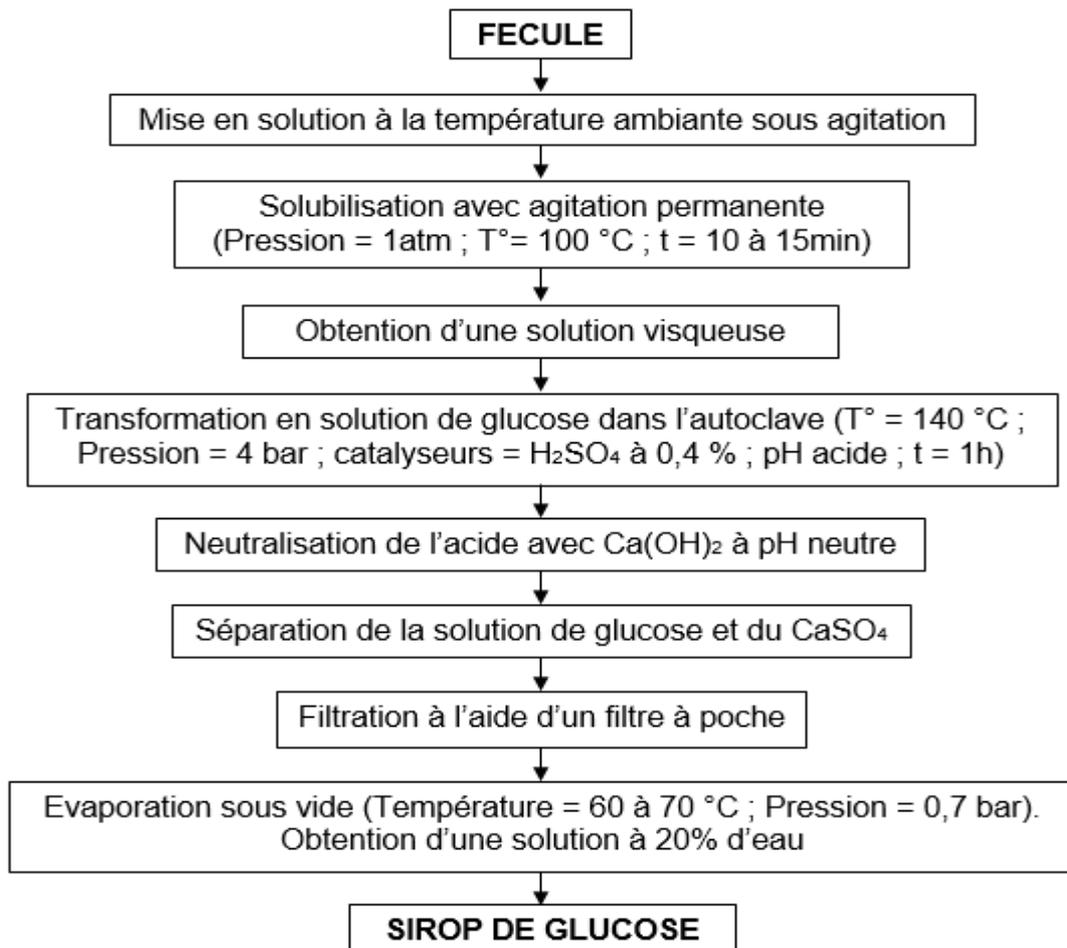


Figure 17 : Diagramme de l'hydrolyse acide (source : RANDRIAMANANTENA)

### III.2.2.2. Hydrolyse enzymatique [4] [16] [19] [22] [25]

Il s'agit d'une réaction catalysée par de l'enzyme de la classe des hydrolases, provenant des céréales germées. Il exige l'action des diverses enzymes amyloлитiques.

#### a) Définition enzyme

Les enzymes sont des protéines qui agissent comme catalyseur de nombreuses réactions biochimiques. Elles possèdent des activités et des spécificités plus importantes que les catalyseurs chimiques.

#### b) Les enzymes amyloлитiques présentes dans le malt

Les enzymes les plus importantes dans le malt sont :

- ✓ l'enzyme débranchante,
- ✓ l'amyloglucosidase,
- ✓ le  $\beta$ - amylase,
- ✓ l' $\alpha$ -amylase.

❖ Enzyme débranchante :

Les enzymes de débranchement sont des glucohydrolases qui hydrolysent directement les liaisons  $\alpha(1-6)$  sans attaqués aux liaisons  $\alpha(1-4)$ . C'est donc une enzyme spécifique pour l'amylopectine. Il s'agit de la pullulanase et de l'isoamylase, toutes deux produites par les micro-organismes et dont l'action complète à 100% des actions liquéfiantes et dextrinisantes des  $\alpha$  et  $\beta$  amylases.

❖ Amyloglucosidase

C'est une exo-enzyme,  $\alpha(1-4)$  D-glucane glucohydrolase encore appelée glucoamylase qui hydrolyse rapidement non seulement les liaisons  $\alpha(1-4)$ , mais aussi les liaisons  $\alpha(1-6)$  de l'amylopectine en libérant du glucose.

Pour l'hydrolyse de maïs en utilisant l'amyloglucosidase, on peut obtenir des hydrolysats d'amidon contenant jusqu'à 95% de glucose, 2% de disaccharides, 3% d'oligosaccharides (D.E.=97). Certaines glucoamylases sont capables de dégrader partiellement l'amidon natif, ce qui, dans l'avenir, pourrait présenter un certain intérêt au niveau industriel.

❖  $\beta$ -amylase

C'est une  $\alpha(1-4)$  glucane maltohydrolase, longtemps extraite des végétaux. Elle hydrolyse de manière récurrente les chaînes d'amyloses à partir de l'extrémité non réductrice en libérant du  $\beta$ -maltose. C'est une enzyme « saccharifiante ».

L'amylopectine, par contre, n'est dégradée qu'au niveau des chaînes extrêmes jusqu'à ce que l'enzyme rencontre une liaison  $\alpha(1-6)$ . C'est une exo-enzyme qui conduit en plus de l'oligosaccharide spécifique à la production de dextrans limites de haut poids moléculaire.

❖  $\alpha$ -amylase

C'est une  $\alpha(1-4)$  D-glucane, 4 glucanohydrolase d'origine végétale, animale ou microbienne. C'est une endo-enzyme qui attaque les chaînes amylose en coupant les liaisons  $\alpha(1-4)$  de tous les 6 glucoses, à partir de l'extrémité non réductrice ; il en résultera principalement la formation de glucose, maltose et surtout de l'alpha dextrans, non colorées par la solution d'iodée mais hydrolysables par une  $\beta$ -amylase.

Cette enzyme hydrolyse enfin les chaînes ramifiées de l'amylopectine en coupant les liaisons  $\alpha(1-4)$  entre les embranchements  $\alpha(1-6)$ , ce qui conduit à une liquéfaction en réacteur du « lait d'amidon » après un empesage brutal ( flash gélatinisation). On dit que l' $\alpha$ -amylase est une enzyme « liquéfiante » ou dextrinisante : à la fin de l'hydrolyse, il restera des dextrans limites contenant environ 5 unités glucose avec la présence d'un embranchement  $\alpha(1-6)$  résistant à l' $\alpha$ -amylase.

c) Mode d'attaque des amylases sur l'amylose et l'amylopectine

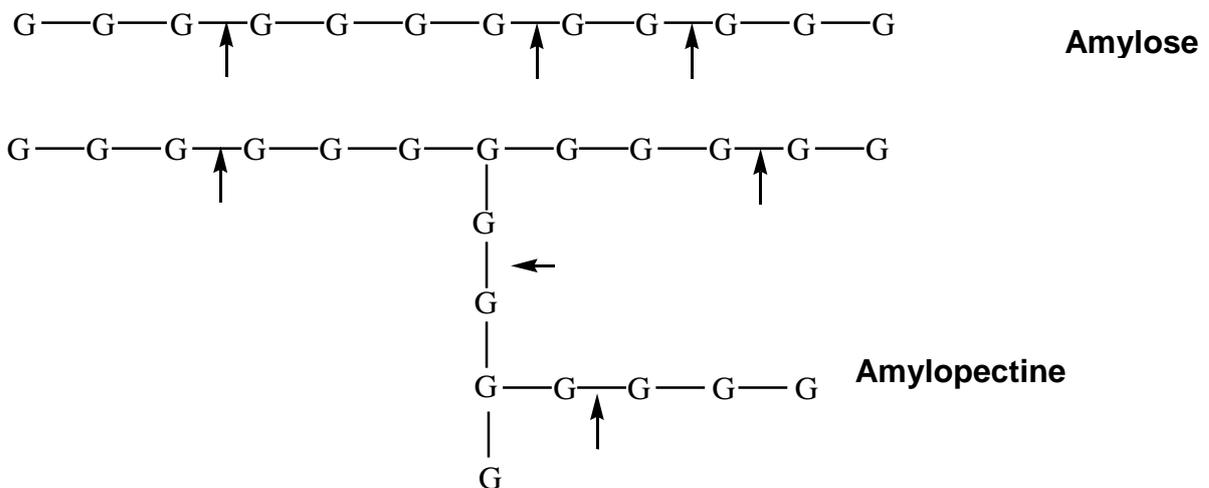


Figure 18 : Mode d'attaque de l' $\alpha$ -amylase (source : SCRIBIN)

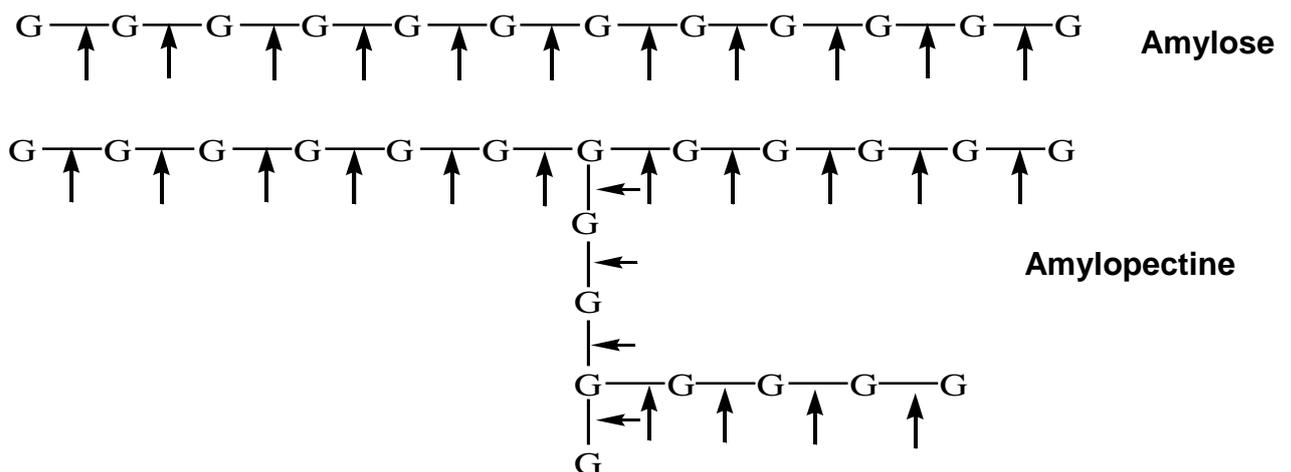


Figure 19 : Mode d'attaque d glucoamylase (source : SCRIBIN)

### III.2.2.3. Hydrolyse acido-enzymatique [12] [16]

La méthode consiste à hydrolyser partiellement l'amidon par l'acide, de neutraliser ensuite le milieu au pH optimal de l'enzyme, puis de compléter l'hydrolyse

par action de l'enzyme. Autrement dit, il s'agit de l'acidification de la bouillie d'amidon par neutralisation et filtration, puis on l'introduit dans un convertisseur enzymatique. Lorsque la conversion est terminée, l'action enzymatique est arrêté en élevant la température et en réglant le pH ; le sirop converti est ensuite raffiné et concentré.

### III.2.3. Comparaisons des types d'hydrolyse [12]

Les comparaisons des types d'hydrolyse sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Comparaisons des types d'hydrolyses

Hydrolyse acide et hydrolyse acido-enzymatique	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Possibilité d'attaque des cuves de réaction</li> <li>-Hydrolyse des autres constituants (lipide, protéine)</li> <li>-Sous-produits dangereux pour l'alimentation animale</li> <li>-Goût indésirable du produit obtenu</li> <li>-Exige une température élevée</li> </ul>
Hydrolyse enzymatique	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Les enzymes n'attaquent que l'amidon</li> <li>-Les céréales germées utilisées comme enzyme contiennent des matières nutritives qui sont conservées à la fin de l'hydrolyse</li> <li>-Les sous-produits peuvent être utilisés pour l'alimentation animale</li> <li>-Température d'hydrolyse relativement faible</li> </ul>

(Source : RANDRIAMANGA)

D'après ce tableau, la méthode d'hydrolyse enzymatique est donc préférable.

### III.2.4. Mise en œuvre de l'hydrolyse : [12] [19] [22]

L'hydrolyse doit être réalisée dans un réacteur muni d'un agitateur. Cette agitation est très importante dans ce processus car si elle est suffisante, cela favorise le phénomène de diffusion dans le milieu réactionnel et si elle est insuffisante, une limitation de diffusion pourra apparaître par accélération des substrats à hydrolyser.

Le réacteur doit être thermostaté, car les différents paliers de température ont une influence sur la cinétique enzymatique. Comme les enzymes sont sensibles aussi aux variations de pH. Il faut tenir compte à leurs conditions opératoires optimales.

Ces conditions opératoires optimales sont présentées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Conditions optimales d'action des enzymes dégradant l'amidon

Enzymes Avec codage	Origines	pH optimum d'action	Température optimum d'action	Type d'attaque	Digestion amidon cru	Produit de dégradation de l'amidon
Isoamylase EC 3.2.1.68	- <i>Pseudomonas amyloclavata</i>	3,5	50-55°C	Endo- enzyme	Non	Chaîne linéaire type amylose
Pullulanase EC 3.2.1.41	- <i>Klebsiella pneumoniae</i>	6,0	50-55°C	Endo- enzyme	Non	Chaîne linéaire type amylose
Amylo- glucosidase EC 3.2.1.3	- <i>Rhizopus</i> - <i>Aspergillus niger</i>	4,8 4,2	55°C 60°C	Exo- enzyme	Oui	glucose
Béta amyrase EC 3.2.1.2	-Orge -Microbienne	5,2 5,0-7,5	63°C	Exo- enzyme	Non	maltose
Alpha amyrase EC 3.2.1.1	-Salive humaine -Pancréas - <i>Aspergillus oryzae</i> - <i>Aspergillus niger</i> - <i>Bacillus subtilis</i> - <i>Bacillus licheniformis</i> -Orge germée	6,9 6,9 5,5 3,5 6,5 6,5 5,8	50°C 55°C 65°C 75-92°C 80-105°C 75°C	Endo- enzyme	Oui	-glucose -maltose -matotriose -oligosides jusque 7 unités glucose

(Source : BENDALI)

### III.2.5. Produit d'hydrolyse partiel ou total selon le type d'enzyme utilisé et ses usages [21]

Le diagramme représentant les produits issus de l'hydrolyse d'amidon est présenté dans la figure 20.

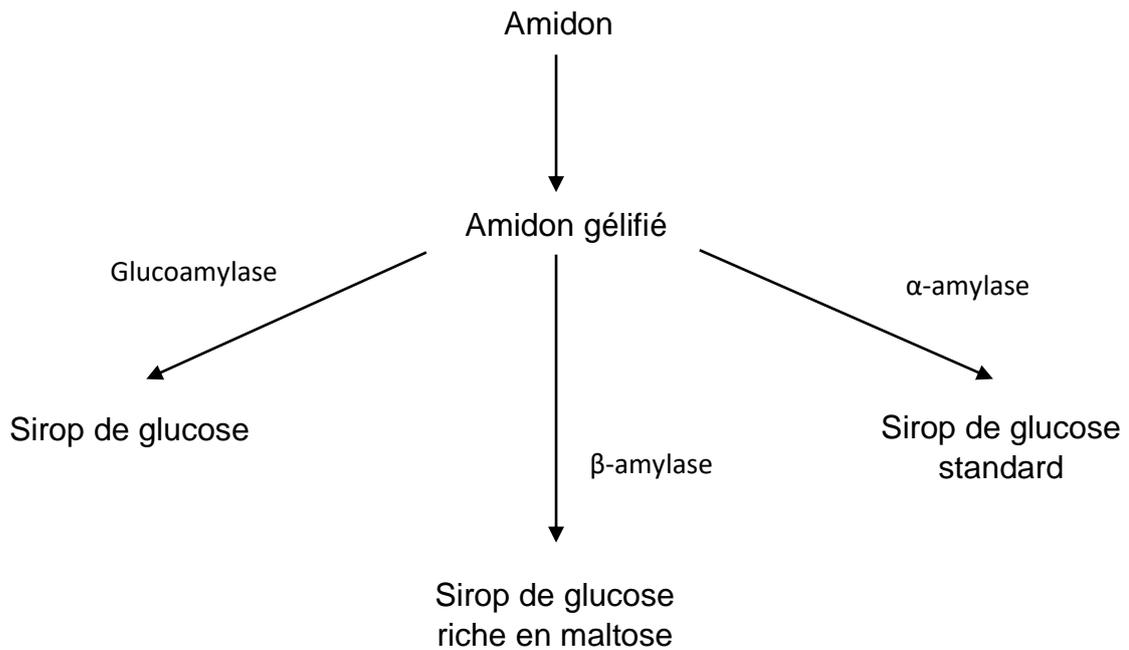


Figure 20 : Diagramme représentant les produits issus de l'hydrolyse d'amidon

Le sirop de glucose est le produit d'une hydrolyse complète d'amidon, qui est généralement employé dans la plupart des industries alimentaires comme la biscuiterie, la pâtisserie, la confiserie et aussi dans les industries de fabrication des boissons sucrées et alcoolisées.

### III.3. FERMENTATION ALCOOLIQUE

#### III.3.1. Définition [26] [27]

Le mot fermentation vient du latin «fervere» qui signifie bouillir, car la réaction apparait spontanément et se traduit par un dégagement de bulles à la surface, un trouble et un échauffement du mout. La fermentation est une réaction de transformation d'un substrat par des micro-organismes.

La fermentation alcoolique est la dégradation anaérobie des matières glucidiques qui, sous l'action des levures du genre « *Saccharomyces cerevisiae* », se transforment en éthanol et gaz carbonique.

Le bilan de fermentation alcoolique est donné par la réaction suivante :



### III.3.2. Mécanisme réactionnel de la fermentation alcoolique [12]

Le mécanisme réactionnel de la fermentation alcoolique se fait en deux étapes qui sont la glycolyse suivie de la décarboxylation de l'acide pyruvique.

Le schéma suivant représente le mécanisme réactionnel de la fermentation alcoolique :

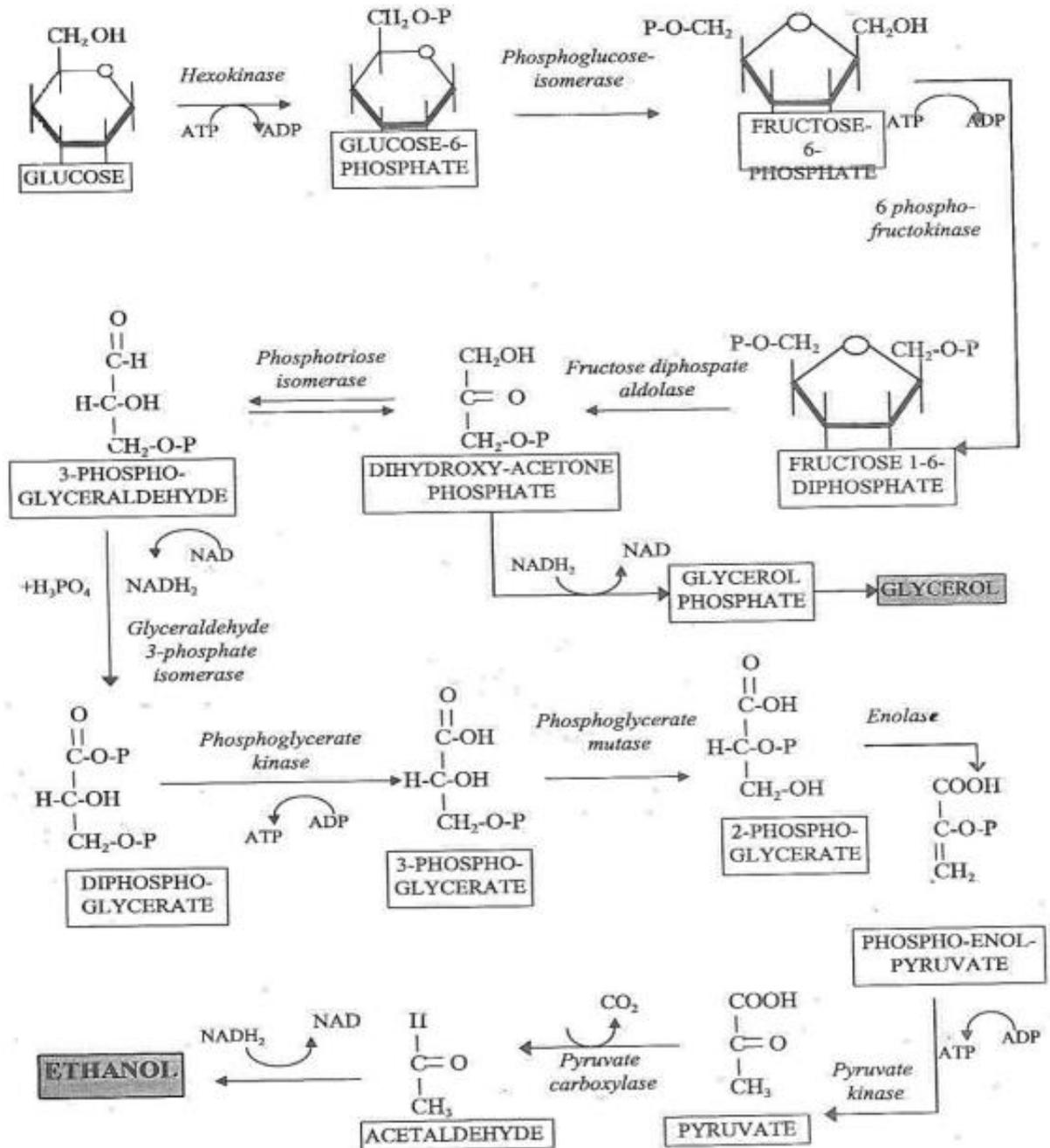


Figure 21 : Mécanisme de la fermentation (source : RANDRIAMANGA)

### III.3.3. Agents de fermentation : la levure

#### III.3.3.1. Définition de la levure [28] [24]

Les levures sont des champignons microscopiques chez lesquels la forme unicellulaire est prédominante, et ce qui sont capable d'emprunter deux voies métaboliques différentes. En aérobiose, la levure se produit et se multiplie : c'est le métabolisme respiratoire ; mais en anaérobiose, elle provoque la fermentation.

La levure la plus utilisée pour la fermentation alcoolique est le *Saccharomyces cerevisiae*. Le développement de cette levure se fait facilement sur l'hydrolysate de l'amidon et elle est capable d'assurer rapidement la fermentation d'une quantité de sucre assez importante.

#### III.3.3.2. Classification systématique de la levure : [28] [24]

Le tableau ci-dessous montre la classification systématique de la levure :

Tableau 7 : Classification systématique de levure

<b>Règne</b>	VEGETAL
<b>Embranchement</b>	THALLOPHYTES
<b>Sous-embranchement</b>	EUMYCETES
<b>Classe</b>	ASCOMYCETES
<b>Sous-classe</b>	HEMIASCOMYCETES
<b>Ordre</b>	ENDOMYCETALES
<b>Famille</b>	SACCHAROMYCETACEAE
<b>Sous-famille</b>	SACCHAROMYCETOÏDAE
<b>Genre</b>	<i>Saccharomyces</i>
<b>Espèce</b>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>

(Source : RANDRIAMANANTENA)

#### III.3.3.3. Propriétés des levures [21]

Cette souche montre une bonne occupation du milieu et un bon taux de cellules vivantes. Elle a le caractère «killer» et elle garde une bonne activité à une température de 36°C. Il n'y a pas apparition de mauvais goût.

En milieu liquide : Les cellules ont une forme elliptique dont certaines sont allongées, d'autres plus arrondies. La culture présente un trouble et lors de la phase active, on observe de la mousse. Cette dernière disparaît en vieillissant en laissant sur la paroi du fermenteur un anneau de levure

En milieu solide : La culture présente des colonies géantes de forme lisse ou granuleuse, pouvant être mûtes ou brillantes souvent saillantes.

Mode de reproduction : Généralement, les levures se multiplient par bourgeonnement. Le bourgeonnement multilatéral caractérise *Saccharomyces*.

#### III.3.3.4. Milieu de culture de la levure [21]

Il s'agit d'un milieu semi-synthétique constitué par :

- Acide phosphorique monopotassique ( $\text{KH}_3\text{PO}_4$ ) : 5 g/l
- Sulfate d'ammonium ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) : 2 g/l
- Sulfate de magnésium ( $\text{MgSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$ ) : 1 g/l
- Extrait de levure : 1 g/l
- Eau distillée : 1 litre
- Glucose apporté en quantité variable

#### III.3.4. Paramètre de la fermentation [14] [21] [26] [24] [29]

##### III.3.4.1. Teneur en substrat carboné

Le substrat sert à la fois aux levures de source de carbone et d'énergie nécessaire à leur développement. Un phénomène appelé « Crabtree » se produit à une concentration en glucose supérieure à 5g/l. C'est-à-dire qu'il y a inhibition de la synthèse des enzymes respiratoires et le mécanisme devient fermentaire quel que soit le niveau d'aération. Les enzymes intervenant dans le métabolisme d'autres sucres sont aussi réprimés par la présence en glucose à cette concentration. Pour une forte concentration en glucose supérieure à 150g/l, il y a inhibition des voies oxydatives et fermentaires. Le contrôle de la teneur en sucre est indispensable avant la fermentation.

##### III.3.4.2. Teneur en oxygène

Quand l'oxygène n'est pas un facteur limitatif, un excès de glucose chez *Saccharomyces cerevisiae* entraîne une production d'éthanol concomitante de l'augmentation de la biomasse (effet Crabtree). Cet effet est contre l'effet PASTEUR : « le catabolisme glucidique est activé par l'anaérobiose et inhibé en présence d'oxygène ». On a admis récemment que de faible quantité d'oxygène est un facteur de croissance pour *Saccharomyces cerevisiae*. Ainsi, la levure *Saccharomyces cerevisiae* oriente son

métabolisme en fonction notamment de la pression partielle d'oxygène du milieu dans lequel elle se développe.

#### III.3.4.3. Température

La température moyenne de développement des levures qui sont des microorganismes mésophiles, se situe entre 20°C et 40°C. La température adéquate pour la croissance levurienne est au voisinage de 30°C.

#### III.3.4.4. pH

Le pH est un paramètre très important car il influe sur les réactions chimiques, biochimiques et par conséquent sur les microorganismes. L'action du pH sur la croissance des microorganismes se situe à trois niveaux : le milieu, la perméabilité membranaire et l'activité métabolique.

Les levures préfèrent un milieu relativement acide (pH compris entre 3 et 6) qui favorise leurs croissances. De plus pour éviter la multiplication des contaminants, la fermentation alcoolique doit se dérouler dans cet intervalle.

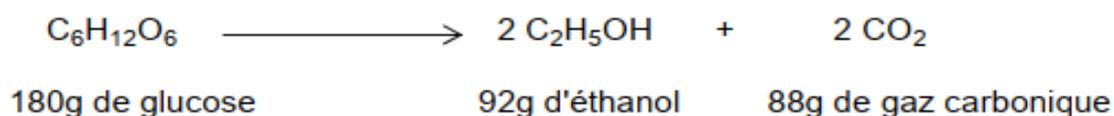
#### III.3.4.5. Agitation

L'agitation est très nécessaire pour assurer l'homogénéisation du milieu polyphasique. Il constitue un milieu de fermentation et la réalisation des transferts de matières (oxygène, gaz carbonique, substrat) et de chaleur. Il existe trois types d'agitation : agitation mécanique, magnétique et pneumatique.

### III.3.5. Produit de la fermentation [14] [21]

#### III.3.5.1. Produit principale

L'éthanol et le gaz carbonique sont les produits principaux formés au cours de la fermentation alcoolique.



##### a. Ethanol

L'éthanol est le produit principal formé au cours de la fermentation alcoolique bien que d'autres substances puissent être produites. Il est reconnu toxique vis à vis des cellules. A partir d'une concentration 12,5°GL, c'est-à-dire 100g/l d'alcool, les levures meurent.

b. Gaz carbonique

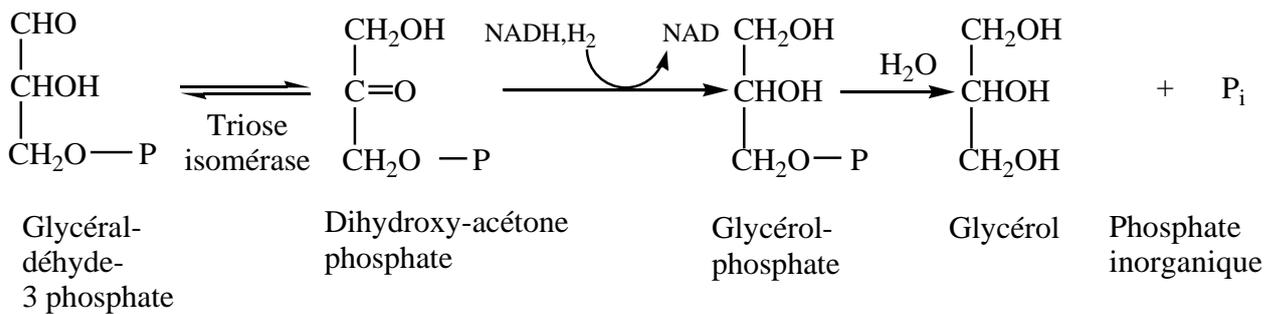
En fermentation, des pressions très élevées en gaz carbonique inhibent la croissance des levures. Ainsi, des pressions en gaz carbonique, déclenche cette inhibition.

III.3.5.2. Produit secondaires

La fermentation alcoolique donne lieu aussi à la formation des produits secondaires qui sont alcools supérieurs, glycérol, aldéhydes, acides et esters. Certains proviennent de la réaction elle-même, d'autres du métabolisme azoté des levures, et aussi des réactions enzymatiques parallèles.

a. Glycérol

La fermentation du glucose par la levure s'accompagne toujours de la formation de petites quantités de glycérol.

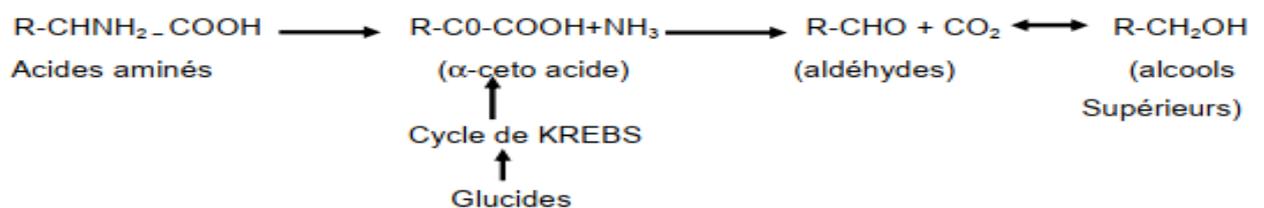


b. Méthanol

Sa formation est engendrée par la richesse en matières pectiques du milieu de fermentation. Le méthanol est un produit toxique pour l'homme à une dose supérieure à 0,118 % dans le sang. La dégradation du méthanol par l'organisme humain est par ailleurs quatre fois plus lente que celle de l'éthanol.

c. Alcools supérieurs

Les alcools supérieurs se forment fréquemment au cours de la fermentation alcoolique à partir des acides issus de la désamination d'acides aminés contenus dans le milieu de fermentation.



### Exemple :

A partir de : valine, on obtient de l'isobutanol,  
leucine, on obtient du 3-méthylbutanol,  
Isoleucine, on obtient du 2-méthylbutanol.

#### d. Esters

La formation des esters est liée aux métabolismes lipidiques des levures. Ils résultent de l'action d'un acide sur l'alcool. L'acétate d'éthyle provient ainsi de l'action de l'acide acétique sur l'alcool éthylique.

#### e. Acide succinique

Elle peut provenir de l'acétique par oxydoréduction.

#### f. Acide acétique

La formation de l'acide acétique est due à la décarboxylation de l'acide pyruvique ou encore à l'oxydation de l'éthanol. La biosynthèse de l'acide acétique est favorisée par les conditions suivantes : l'élévation de la température et les milieux fermentés non distillés immédiatement après la fin de la fermentation alcoolique. Le plus simple moyen pour éviter une trop forte production d'acide acétique consiste à abaisser le pH du moût.

### **III.3.6. Usage de l'alcool [21]**

L'avantage de l'alcool de fermentation réside dans son intérêt de disposer une source de matière première peu coûteuse.

L'alcool a une large gamme d'utilisation : alcool de bouche, dans l'usage alimentaire tel que les épices, les condiments et les colorants alimentaires. Il sert aussi de matière première ou de réactif de fabrication dans de nombreuses industries chimiques (pharmacie, parfumerie,...).

### **III.4. DISTILLATION [14] [23]**

La distillation est une opération de séparation du mélange de substances liquides miscibles dont les températures d'ébullition sont différentes. Elle permet de séparer les constituants d'un mélange homogène. Sous l'effet de la chaleur ou d'une faible pression (loi des gaz parfaits), les substances se vaporisent successivement, et la vapeur obtenue est liquéfiée pour donner le distillat.

Dans notre cas l'éthanol et l'eau, on peut les séparer puisque leur température d'ébullition est différente. En effet, celle de l'eau est de 100°C tandis que le l'éthanol bout à 78,3° C. Il faut alors réaliser une distillation afin de séparer ces deux liquides.

L'efficacité de la séparation dépend des propriétés physiques des constituants, de l'appareillage utilisé et des méthodes de distillation mises en œuvre qui sont :

- Distillation simple
- Distillation fractionnée

#### **III.4.1. Distillation simple**

La distillation simple a but de séparer le composé le plus volatil contenu dans un mélange liquide. Elle consiste à introduire une charge du mélange à traité dans une chaudière (bouilleur) où se produit l'ébullition sous pression constante.

La vapeur s'échappant du bouilleur est condensée, le liquide étant ainsi directement recueilli.

#### **III.4.2. Distillation fractionnée**

La distillation factionnée a pour but de séparer les constituants volatils d'un mélange et de les obtenir à l'état pratiquement pur. Par comparaison à une distillation simple, dans la rectification, on ne prélève pas la totalité du distillat car après condensation, une partie retourne dans l'appareil qui effectue l'opération. Elle permet d'obtenir jusqu'à 95 % d'alcool.

La rectification se réalise dans une colonne à plateau ou à garnissage qui peut fonctionner en continu ou en discontinu.

# Chapitre IV. GENERALITES SUR LES BOISSONS

## ALCOOLISEES

### IV.1. Généralités sur l'alcool [29]

#### IV.1.1. Définitions et utilisations

L'alcool est un composé chimique, de nature organique, de formule générale ROH. R est le radical qui se lie au groupement hydroxyle –OH. La polarisation forte de la liaison O-H donne la possibilité d'une rupture ionique : les alcools constituent donc des acides faibles.

Les alcools les plus courants sont :

- le méthanol,  $\text{CH}_3(\text{OH})$ , dérivé du méthane,
- l'éthanol,  $\text{CH}_3\text{-CH}_2(\text{OH})$ , dérivé de l'éthane,
- le propanol,  $\text{C}_3\text{H}_7(\text{OH})$ , dérivé du propane,
- le butanol,  $\text{C}_4\text{H}_9(\text{OH})$ , dérivé du butane.

Les alcools sont utilisés dans l'industrie chimique comme solvants organiques tel que l'éthanol (peu toxique, est utilisé dans les parfums et les médicaments), comme combustibles en ce qui concerne le méthanol et l'éthanol et qui peuvent remplacer l'énergie d'origine fossile car leur combustion ne produit pas de fumées toxiques.

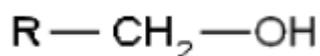
L'industrie n'y a recours que dans le cas de l'éthanol pour produire les combustibles et les boissons.

#### IV.1.2. Classification de l'alcool

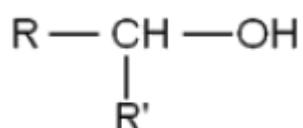
Les alcools sont classés suivant la structure chimique. Son nom scientifique dépend de la longueur de la chaîne de carbone et de sa ramification, la nomenclature se termine par –ol (exemple : méthanol, butanol, méthyle-3butanol,...). La classification de l'alcool est utilisée pour bien différencier la nature et la composition chimique d'un composé alcoolique. Selon le nombre de groupes hydroxyle rattachés à la chaîne hydrocarbonée, on distingue les mono-alcools, les diols, les triols et les polyols.

Selon le nombre de ramification de la chaîne de carbone, il existe trois classes d'alcool, qui sont :

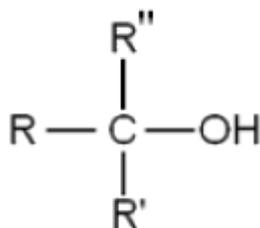
- Les alcools primaires de formule générale  $RCH_2OH$ , dont le carbone comportant le groupement hydroxyle est lié au moins à deux atomes d'hydrogène et d'un radical organique R :



- Les alcools secondaires de formule générale  $R_2CHOH$ , dont le carbone comportant le groupement hydroxyle est lié à un atome d'hydrogène et deux radicaux organiques R et R' :



- Les alcools tertiaires de formule générale  $R_3COH$ , dont le carbone comportant le groupement hydroxyle est lié à trois radicaux organiques R, R' et R'' :



#### IV.2. Historique [29] [30]

La fermentation a été connue depuis un temps très reculé. Les chinois connaissaient, depuis la haute antiquité, des boissons à base de riz fermenté. Les Egyptiens utilisaient également des procédés connus en Orient pour préparer des boissons alcoolisées comme la bière. Ces boissons n'étaient distillées qu'au moyen-âge.

Rhazes (850- 923) était le premier à avoir donné une description de l'extraction de l'alcool. Mais c'était Gilles de Couberville en 1553, inventeur des eaux de vie qui construisait un alambic pour distiller les cidres.

Depuis ces temps, la technique de fabrication ne cesse d'évoluer jusqu'à la production industrielle de ces boissons.

### IV.3. Définitions [19]

On appelle boisson, tout liquide pouvant être bu par plaisir ou par besoin .On exclut dans cette catégorie les liquides toxiques et les médicaments. De même, il est habituel d'exclure le lait qui est considéré plus comme aliment que boisson.

Il existe plusieurs catégories de boissons, suivant leurs caractères organoleptiques :

- Boisson naturelle : eau de source, eau minérale,....
- Boisson sucrée : sirop, jus de fruit,...
- Boisson alcoolisée : vin, bière, whisky,....

Les boissons alcoolisées résultent de la fermentation de jus sucré suivie de la distillation ou non. On peut dire que la présence de l'alcool éthylique est l'un des caractères communs à toutes ces boissons.

### IV.4. Différentes sortes de boisson alcoolisées [19] [29] [30]

Les boissons alcoolisées peuvent être classées en deux parties suivant les matières premières utilisées :

- Boissons à partir du jus sucré
- Boissons à partir des matières amylacées.

#### IV.4.1. Boissons à partir du jus sucré

##### ○ Non distillée :

- VIN : provenant exclusivement de la fermentation du raisin frais ou jus de raisin frais.
- CIDRE : boisson à partir de la fermentation du jus de pomme.
- HYDROMEL : boisson à partir de la fermentation du miel.
- POIRE : boisson obtenue par la fermentation du jus de poire.

##### ○ Distillée :

- EAU-DE-VIE : liqueurs alcooliques extraite par distillation du vin ou de sucres végétaux.
- RHUM ou TAFIA : eau de vie de canne à sucre.

#### IV.4.2. Boisson à partir des matières amylacées

Les produits amylacés sont des produits tels que la patate douce, le manioc, la pomme de terre, le riz, l'orge,....dont le constituant principal est l'amidon.

- **Non distillée**
  - BIERE : boissons obtenue par la fermentation alcoolique d'un mout fabriqué avec du houblon et du malt pur d'orge ou associé à 30% au poids de malt céréales, de matières amylacées.
  - SAKE : boisson traditionnelle japonaise à base de riz.
  - KASHIRI boisson traditionnelle Guyanaise à partir de la fermentation d'une racine entière du manioc.
  - PAIWARI : boisson traditionnelle antillaise à partir de la fermentation de manioc masticqué.
- **Distillée**
  - WHISKY: liqueur provenant de la distillation de malt d'orge et orge fermenté.
  - SHOCHU : boisson à partir de la patate douce, le procédé se rapproche beaucoup de celui du whisky excepté que le koji, l'équivalent de la souche de levure pour le whisky.

#### **IV.5. Technique de fabrication [19] [29] [31]**

##### **IV.5.1. Le vin**

Il existe deux types de vin : Le vin rouge et le vin blanc. Le principe global de la fabrication est identique, la différence se situe surtout au niveau de la préparation de mout à fermenter.

Le procédé de fabrication du vin se divise en trois parties :

- 1<sup>ère</sup> partie : Cette partie regroupe les opérations d'extraction du jus dans le raisin. Pour la préparation du vin blanc, on enlève tout de suite le marc contenant des matières colorantes. Mais pour le rouge, on laisse macérer ce marc pendant un temps plus ou moins long afin de faciliter la diffusion de ces matières colorantes.
- 2<sup>ème</sup> partie : C'est la fermentation proprement dite à l'aide des levures indigènes ou des souches pures.
- 3<sup>ème</sup> partie : La dernière partie recouvre les différents traitements appliqués au vin pour le clarifier, pour améliorer le goût et le conserver.

La figure suivante donne le schéma de la technique de la fabrication du vin.

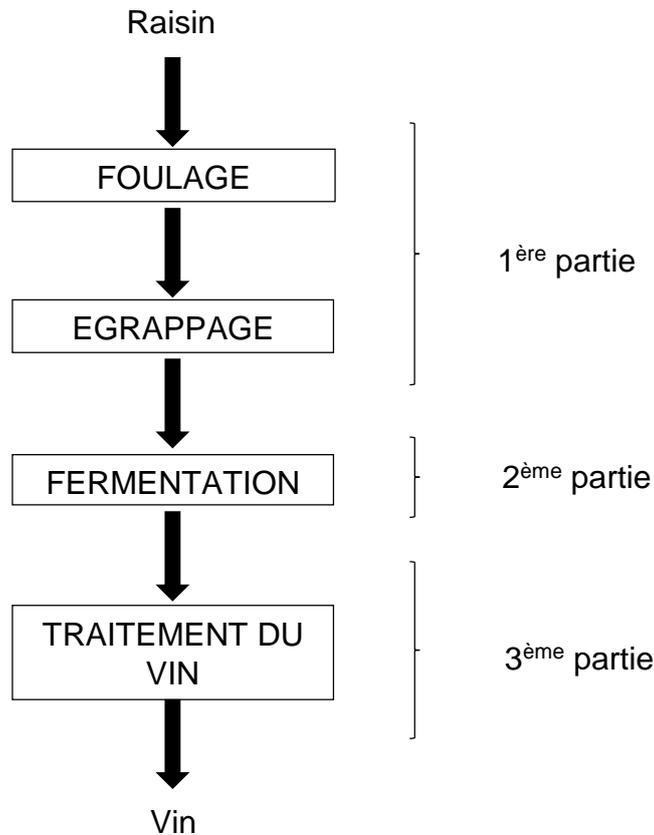


Figure 22 : Fabrication du vin (source : RAKOTOSAONA et ANDRIANONINTSOA)

#### IV.5.2. La bière

On peut diviser la fabrication de la bière en quatre parties bien distinctes :

- La première partie consiste à préparer les matières premières et à les transformer en sucres fermentescibles. Cette opération est appelée brassage. Le brassage est effectué dans une cuve appelée cuve matière et cuve de trempage.
- La deuxième partie est l'aromatisation par houblon et le traitement du liquide sucré obtenu dans la première partie.
- Dans la troisième partie, on fermente ce liquide sucré. L'agent de fermentation utilisé est la levure du genre *saccharomyces*. La durée de la fermentation varie de 4 à 7 jours.
- La dernière partie consiste à l'affinage de la bière c'est-à-dire élimination des impuretés, amélioration du goût, ... et la conservation du produit fini.

Le procédé que nous avons énuméré ci-dessus est un procédé industriel dont la production atteint plus de 200hl par jour.

La technique de fabrication de bière est présentée dans la figure 17.

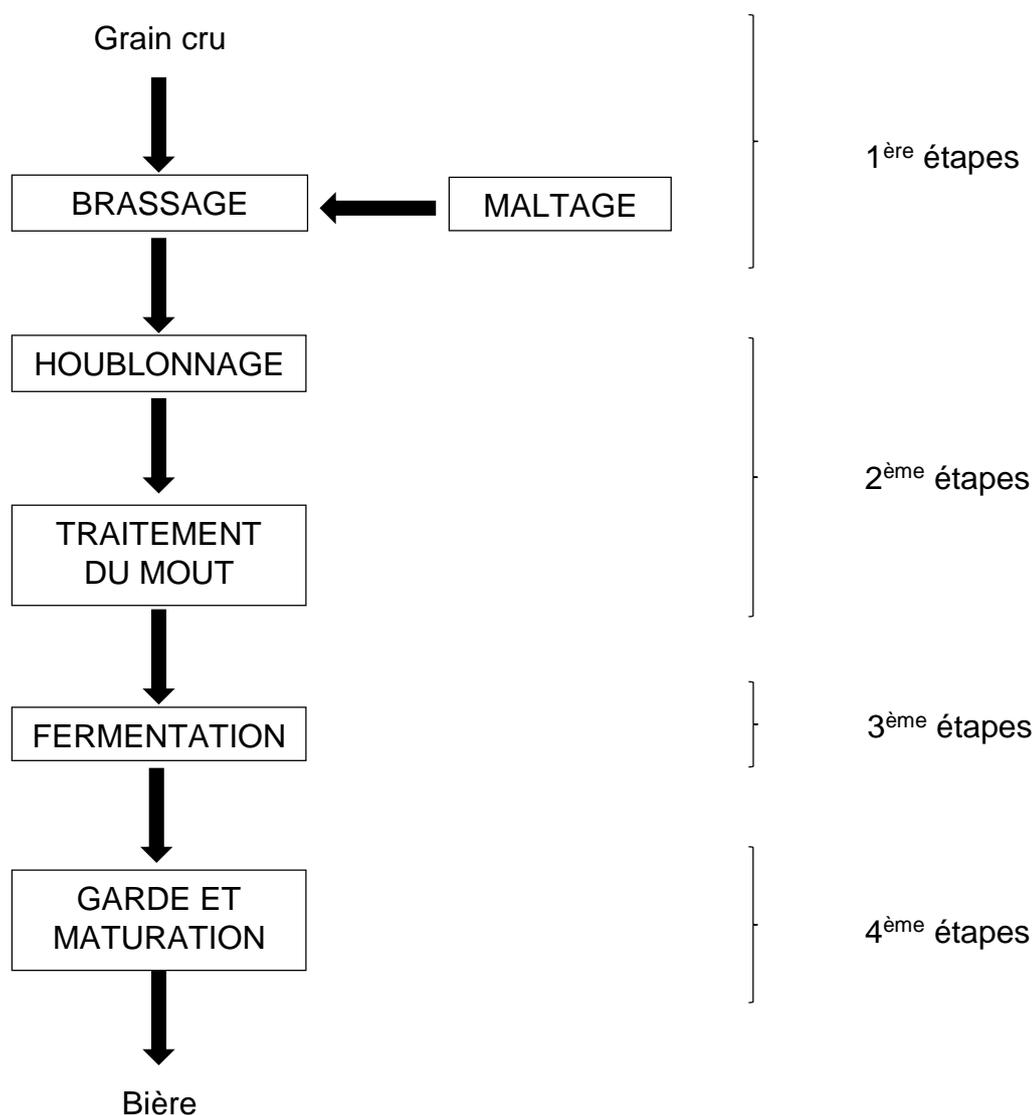


Figure 23 : Fabrication de bière (source : RAKOTOSAONA et ANDRIANONINTSOA)

### IV.5.3. Autres boissons alcoolisées

Beaucoup de boissons alcoolisées, principalement de types régionaux, sont fermentées à partir de jus du fruit autre que raisin ou préparé à partir de grains autre que l'orge ; ils sont appelés par plusieurs noms tels que le saké, le Ginger beer (bière faite à base de gingembre), le cidre, le grog, le pulque, etc.

## PARTIE II. ETUDES EXPERIMENTALES

# Chapitre V. MATERIELS ET METHODES

## V.1. MATIERE PREMIERE

Les tubercules de manioc que nous utilisons pendant tous les essais de fabrication d'éthanol, sont cultivés par nous même à VINANINKARENA dans le district ANTSIRABE II de la Région de VAKINANKARATRA.

## V.2. DIAGRAMME DE PROCEDE DE FABRICATION

La figure ci-dessous montre les cinq grandes opérations à suivre lors de la production de l'éthanol.

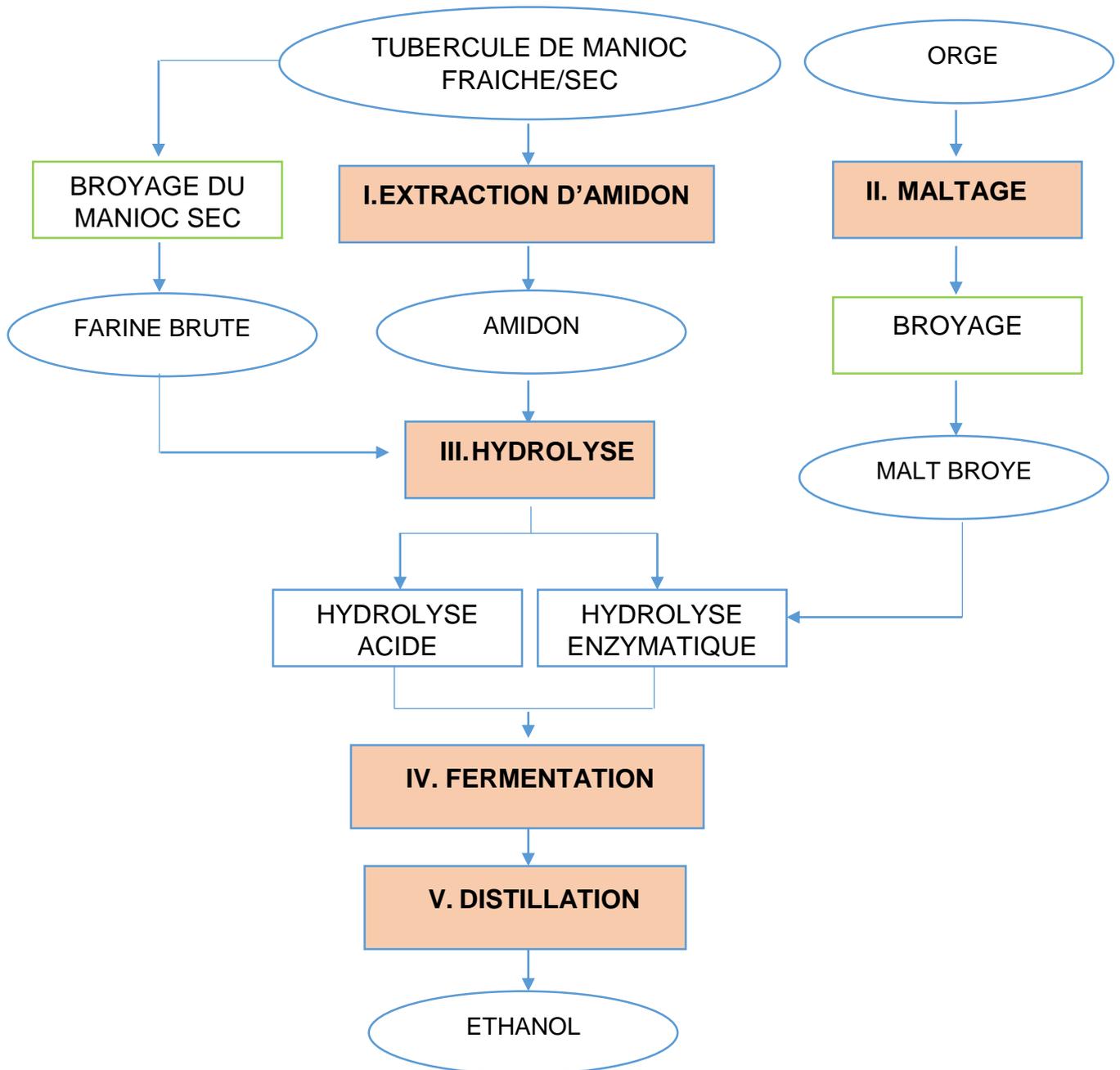


Figure 24 : Etapes de la fabrication d'éthanol (source : Auteur)

### V.3. EXTRACTION D'AMIDON

#### V.3.1. Diagramme de procédé d'extraction d'amidon

Lors de l'extraction d'amidon, on obtient aussi de la farine épuisée. L'obtention de l'amidon et de la farine épuisée est représentée dans la figure ci-dessous.

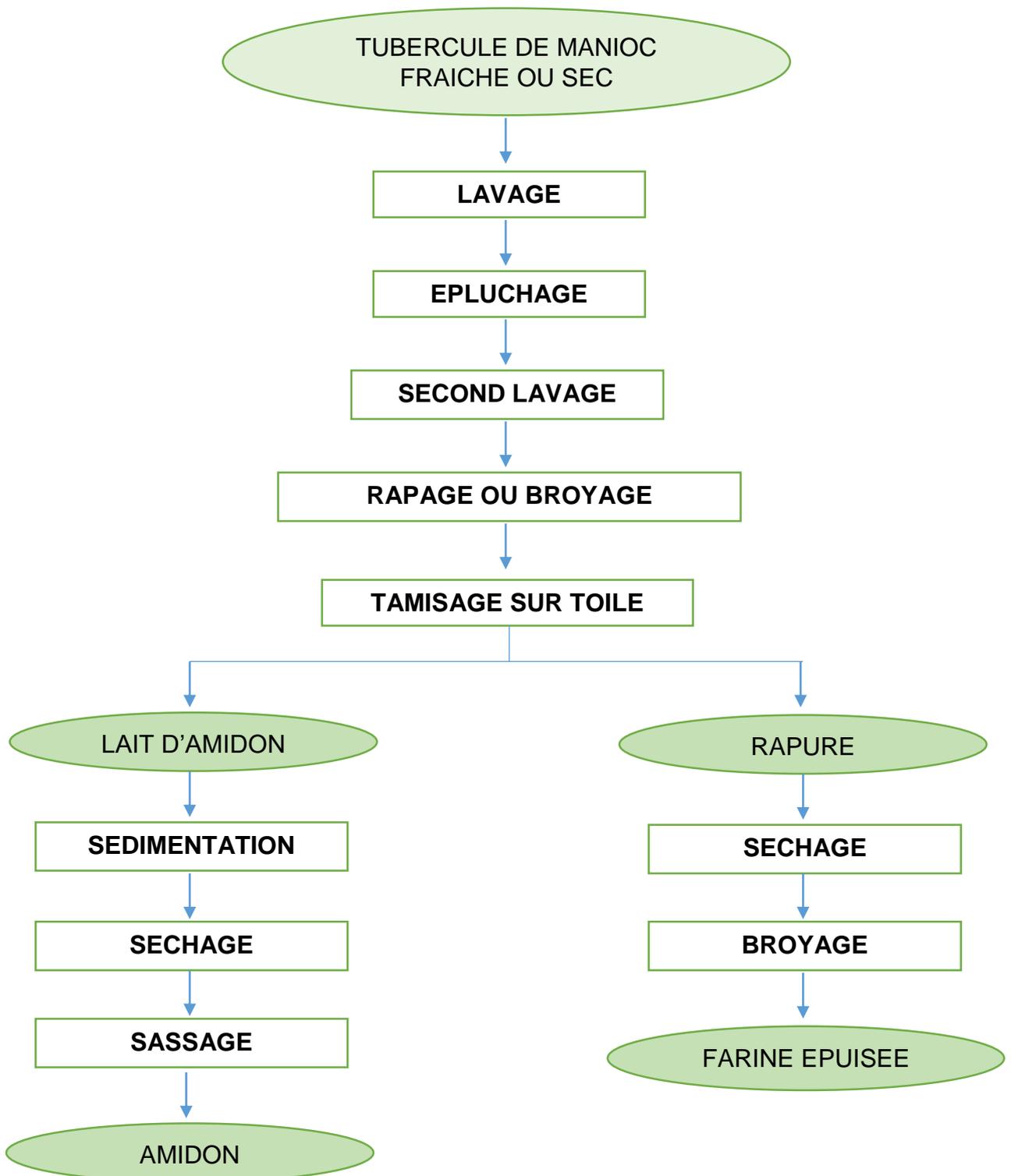


Figure 25 : Procédé d'extraction d'amidon (source : Auteur)

### V.3.2. Extraction d'amidon

Plusieurs étapes sont affectées aux tubercules de manioc pour être transformé en amidon.

#### V.3.2.1. Matériels

- Tubercules de manioc
- Couteaux inoxydables, rappe
- Filtre en toile ou « lamba sogá »
- Eau de robinet
- Seau en plastique

#### V.3.2.2. Mode opératoire

Après récolte, la première étape, c'est le lavage dans une bassine d'eau et le brossage de la partie externe des tubercules. Dans cette opération, toutes les impuretés sont éliminées et pour que la suite des opérations ne se déroulera pas dans la saleté. Il a pour but d'obtenir un produit de bonne qualité.

Ensuite, l'épluchage à l'aide d'un couteau est nécessaire pour débarrasser la partie indésirable (on trouve dans cette couche, la plus grande partie du glucoside cyanogénétique de tubercule de manioc). On procède encore au second lavage avec de l'eau potable pour avoir une bonne propreté de l'extrait.

Une fois lavé, il faut découper en petits morceaux les tubercules épluchés par râpage. On ajoute à la pulpe de l'eau en grande quantité et on la frotte fortement pour en extraire l'amidon. On sépare le lait d'amidon de râpure en faisant passer sur un tamis en toile (« lamba sogá »). Les râpures restent sur le tamis en toile et le lait d'amidon est récupéré dans un seau en plastique. Donc on obtient deux produits :

- lait d'amidon,
  - râpures.
- ❖ Lait d'amidon

On laisse le lait d'amidon au repos dans un seau en plastique environ 12 heures pour se sédimenter. On remarque qu'il y a séparation de l'amidon et de l'eau contenant des matières solubles. On débarrasse alors l'eau surnageant et on fait un système de lavage d'amidon récupéré à la première sédimentation et on recommence encore la

sédimentation. Cette opération a pour but d'obtenir un de l'amidon bien propre et de bonne qualité.

La dernière étape, c'est de récupérer l'amidon déposé au fond du sceau en le séchant au soleil. On le pulvérise et on le met dans un sac plastique après séchage pour son stockage.

#### ❖ Râpures

Les râpures restant sur le tamis contiennent encore d'amidon mais sa teneur est très faible. Elles sont soumises à une opération de séchage suivi du broyage pour en obtenir de la farine qui est presque épuisée.

Les opérations effectuées sont rassemblées dans la figure suivante :



Figure 26 : Illustration des opérations effectuées lors d'extraction d'amidon (source : Auteur)

### V.3.3. L'humidité d'amidon et pourcentage de la matière sèche

#### V.3.3.1. Principe

L'humidité est la quantité d'eau libre dans une substance. Pour cela, il s'agit d'évaporer l'eau libre par dessiccation dans une étuve jusqu'à avoir une masse constant de la substance.

#### V.3.3.2. Matériels utilisés

Durant la détermination de l'humidité d'amidon, nous avons utilisés des matériels comme suite :

- Etuve
- Capsule
- Balance de précision
- Dessiccateur

#### V.3.3.3. Mode opératoire

La capsule bien lavée est mise dans l'étuve à une température  $103^{\circ}\text{C}\pm 2$  pendant une heure pour être bien séché et on la laisse refroidir dans un dessiccateur pendant 30mn pour prendre sa masse.

Cinq grammes d'échantillon sont introduits dans chacune de ces capsules et on les pèse avant de les remettre à l'étuve de même température que celle du séchage mais la durée augmente de six heures. Après étuvage, un refroidissement de la capsule muni de l'échantillon dans un dessiccateur est effectué afin d'éviter le contact avec l'air ambiant. Puis, l'échantillon est pesé directement au moyen d'une balance de précision.

#### V.3.3.4. Expression du résultat de l'humidité et le rendement d'extraction

L'humidité d'amidon est déterminée par la formule suivante :

$$H \% = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100$$

Avec :  $H \%$  : humidité d'amidon (pourcent)

$m_0$  : masse de la capsule vide (en gramme)

$m_1$  : masse de la capsule munie de l'échantillon avant étuvage (en gramme)

$m_2$  : masse de la capsule munie de l'échantillon après étuvage (en gramme)

Le pourcentage de la matière sèche peut être exprimé selon la formule suivante :

$$MS\% = 100 - H \%$$

Avec  $MS\%$  : matière sèche (pourcent)

## V.4. Maltage

Pour la fabrication du malt, nous avons utilisé de l'orge achetée auprès des agriculteurs de la région du VAKINANKARATRA qui approvisionnent la société MALTO S.A.

L'eau que nous avons utilisé pendant toutes les opérations de maltage, c'est l'eau de JIRAMA. C'est-à-dire que la température de travail varie de 18°C à 25°C (température ambiante).

### V.4.1. Calibrage et nettoyage

L'homogénéité des grains est obtenue par tamisage. Les grains doivent être lavés dans un récipient rempli d'eau pour éliminer les impuretés comme les poussières, les microorganismes, les produits chimiques adhérant à leurs surfaces.



Figure 27 : Lavage et trempage de l'orge (source : Auteur)

### V.4.2. Opération du trempage

Pour cette expérience, nous avons adopté finalement le diagramme de cycle de trempage et d'aération afin de lever la dormance des grains d'orge et de favoriser sa germination. Mais, il faut noter que l'eau doit être changée à chaque période sous eau.

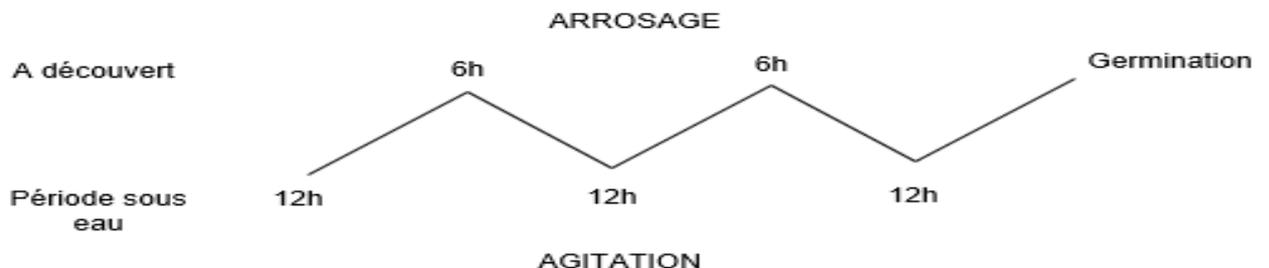


Figure 28 : Diagramme de trempage (source : Auteur)

A la fin du trempage, on observe un gonflement des grains, c'est-à-dire qu'il y a une forte augmentation de volume des grains, et que la plupart de ces grains sont déjà piquée.

#### **V.4.3. Opération de germination**

Cette étape est la plus importante pour le développement des grains et l'activité enzymatique et se déroule dans un germoir. Les grains obtenus après trempage sont étalés en couche uniforme sur une couche mince de coton hydrophile d'épaisseur environ 5 mm imbibée d'une quantité suffisante d'eau pour germination.

Le germoir qui contient les grains d'orge humidifiés, est placé à l'obscurité à température ambiante pour éviter les rayonnements solaires (lumière) pouvant avoir une réaction dénaturante sur les enzymes. Après 3 à 5 jours, nous avons arrêté la germination quand la longueur du germe atteint 3 à 5 cm.

Dans cette opération, nous avons obtenu du malt vert.



Figure 29 : Germeur contenant de l'orge à germer (source : Auteur)

#### **V.4.4. Opération de touraillage**

Nous avons d'abord séché le malt vert issu de la germination à une température qui ne dépasse pas 50 °C, pendant une trentaine heures afin de réduire le taux d'humidité des grains à environ 10 %.

Le touraillage est ensuite effectué à une température de 85 °C pendant 3 h, l'humidité passe de 10 % à 4 %.



Figure 30 : Malt vert (source : Auteur)



Figure 31 : Malt broyé (source : Auteur)

## V.5. Hydrolyses

Dans cette étude, nous avons utilisés deux méthodes pour obtenir un rendement maximum en sucre fermentescibles. Ce sont :

- L'hydrolyse acide (HCl)
- Hydrolyse enzymatique par maltage

### V.5.1. Matériels utilisés

- Balance de précision
- Erlenmeyer 1000ml
- Baguette en verre
- Bain marie thermostatisé
- Eprouvette gradué
- Thermomètre

Mais pour déterminer la concentration en glucose dans le moût, nous utilisons la méthode de dosage par Liqueur de Fehling.

### V.5.2. Dosage des glucoses par liqueur de Fehling

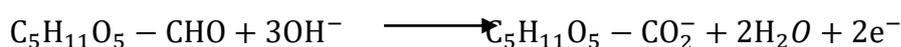
Durant toute l'opération, nous avons suivi comme méthode de détermination de la concentration en glucose dans le moût, la méthode de dosage par liqueur de Fehling après avoir effectué l'hydrolyse.

Cette méthode de dosage repose sur la réduction de la liqueur de Fehling, mélange d'une solution de sulfate de cuivre et de tartrate double de sodium et de potassium en présence de soude, par les sucres présents dans le moût ou le vin.

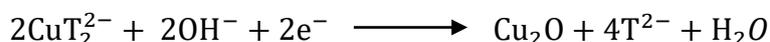
#### ❖ Principe de dosage :

Le glucose ( $C_5H_{11}O_5 - CHO$ ) peut réduire l'ion complexe  $CuT_2^{2-}$  de couleur bleu de la liqueur de Fehling en un précipité rouge brique  $Cu_2O$ . Comme le milieu est basique, le glucose est oxydé en ion gluconate ( $C_5H_{11}O_5 - CO_2^-$ ) par les demi-réactions redox de la réaction bilan suivante :

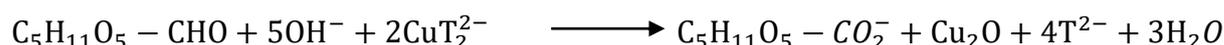
Réaction d'oxydation



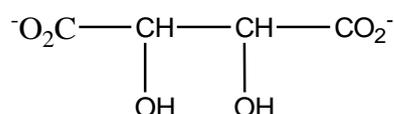
Réaction de réduction



Réaction bilan



Avec :  $T^{2-}$  ion tartrate



#### ❖ Mode opératoire :

La préparation des réactifs utilisés pendant le dosage des glucoses dans le moût est présentée dans l'annexe 1.

Etape 1 : Etalonnage de la liqueur de Fehling

- mélanger 10ml de solution A et 10 ml de solution B, puis 30 ml d'eau distillé,
- introduire la solution étalon de glucose de concentration C dans la burette,

- verser progressivement cette solution étalon dans le mélange après les avoir chauffés,
- l'opération s'arrête dès qu'un précipité rouge brique apparaît,
- noté V, le volume de la descente.

Etape 2 : Dosage des glucoses dans le moût

- Même principe que celle de l'étape1, mais la solution étalon du glucose est remplacée par le moût obtenu durant l'hydrolyse.
- Soit V' le volume versé et C' sa concentration.

❖ **Mode de calcul :**

Soit D le facteur de dilution,

- C sucres (mol/l) =  $10 \times V/V' \times D$
- C sucres (g/l) =  $10 \times V/V' \times D \times 180$

On peut utiliser aussi une droite d'étalonnage pour la détermination de la concentration de glucose par méthode par extrapolation graphique à condition de ne pas dépasser la concentration 15 g/l. Si non, on doit diluer préalablement la solution à doser et de tenir compte cette dilution ( $0 < x < 15$ ) puisque la concentration en cuivre contenant dans la liqueur de Fehling est fixée lors du dosage.

Lorsque la concentration en glucose est faible, il faut une descente de la burette très élevée.

Cette droite est définie par l'équation suivante :

$$y = -\frac{7}{5}x + 21$$

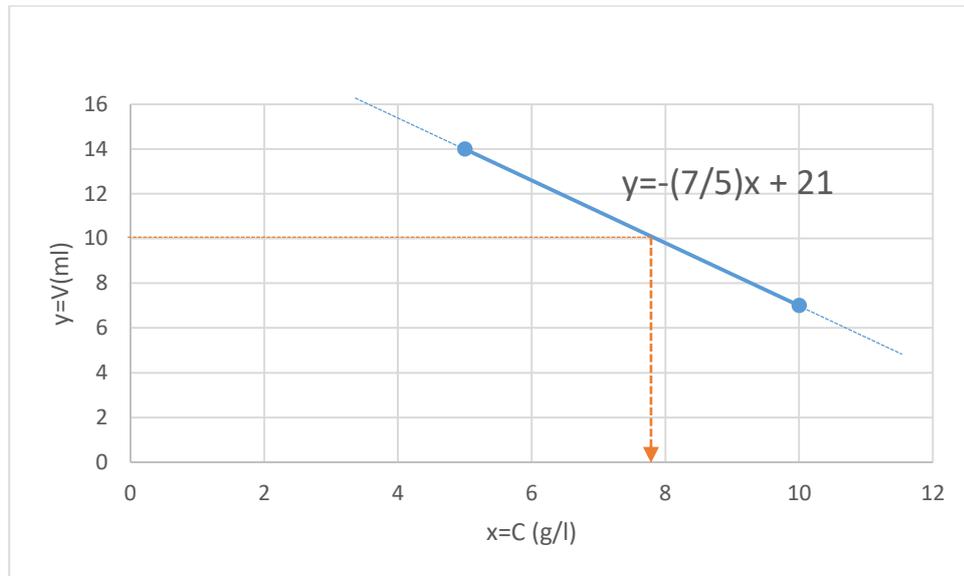


Figure 32 : Droite d'étalonnage

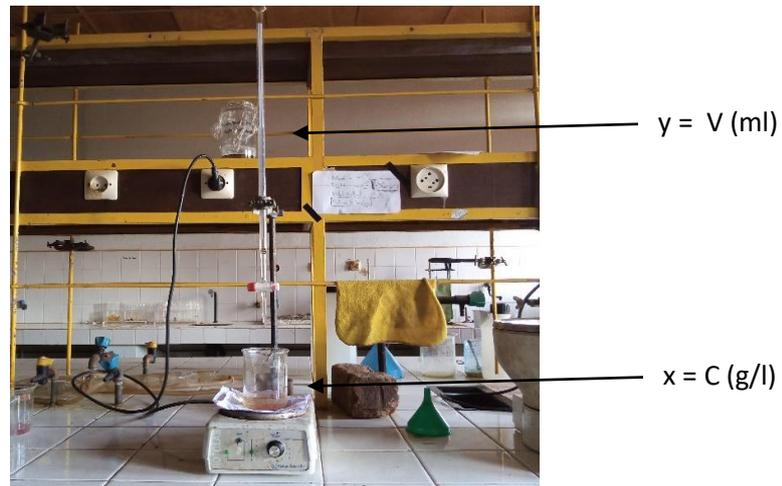


Figure 33 : Dosage de glucose par liqueur de Fehling (source : Auteur)

### V.5.3. Calcul de rendement d'hydrolyse

L'expression du rendement chimique d'hydrolyse est la suivante :

$$\rho\% = \frac{m_s}{m_a} * 100$$

$m_s$  : masse de glucose contenue dans le moût (g)

$m_a$  : masse d'amidon ou de la farine brute ou masse de la farine épuisée utilisé (g)

$\rho\%$  : rendement d'hydrolyse (%)

#### V.5.4. Hydrolyse acide

##### ❖ Mode opératoire :

- Peser  $m_a$  gramme d'amidon en ajoutant 500 ml d'eau,
- ajouter  $V$  millilitre d'HCl à 33% en tenant compte que 0.2 g correspond à 5 ml (HCl à 3,56 mol/l : techniquement 33% dilué au 1/3),
- chauffer à une température  $T = 80$  °C, pendant une heure et en agitant la solution,
- neutraliser la solution avec du soude,
- ramener le volume de la solution à l'état initial pour faciliter le calcul,
- faire le dosage du sucre réducteur formé durant l'hydrolyse par la méthode liqueur de Fehling.

##### ❖ Essai d'hydrolyse acide de l'amidon

Le tableau 8 illustre la charge et ainsi que le temps pour l'hydrolyse acide d'amidon.

Tableau 8 : Essai d'hydrolyse acide d'amidon

	1 <sup>ère</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai	3 <sup>ème</sup> essai
Masse d'amidon $m_a$ (g)	5	5	50
Volume d'eau (ml)	500	500	500
Volume d'HCl 33% (ml)	42	42	42
Durée (mn)	60	120	120

(Source : Auteur)

#### V.5.5. Hydrolyse enzymatique par la méthode de maltage

##### ❖ Principe

Sous l'action conjuguée des enzymes amylolytiques, l'amidon est hydrolysé et se transforme en maltodextrine puis en maltose, et enfin en glucose.

##### ❖ Méthode d'hydrolyse

Cette partie est divisée en 3 étapes :

- développement des enzymes de types hydrolases ou amylases dans les grains d'orge (déjà donné dans le paragraphe maltage),
- préparation du substrat (gélification de l'amidon),
- hydrolyse enzymatique proprement dite.

#### V.5.5.1. Gélification

L'amidon que nous avons obtenu dans l'étape d'extraction d'amidon, est ensuite passé à un autre traitement appelé « gélification ».

##### ❖ Principe

La structure de l'amidon à l'état naturel constitue une barrière à l'action des enzymes. L'amidon est pratiquement insoluble dans l'eau froide et c'est pour cela qu'on doit le chauffer à une température plus ou moins élevée. Il devient amorphe et miscible dans l'eau à toute proportion.

##### ❖ Mode opératoire :

- Peser 50 grammes, 100 grammes d'amidon de manioc
- Mettre dans un erlenmeyer
- Ajouter 500 millilitres d'eau distillée
- Faire cuire dans un bain marie à une température 80°C pendant une heure
- Agiter la solution pour éviter l'agglomération



Figure 34 : Gélification d'amidon (source : Auteur)

A la fin de la gélification, nous avons obtenu une solution visqueuse d'empois d'amidon appelé « amidon gélifié ».



Figure 35 : Solution visqueuse ou amidon gélifié (source : Auteur)

### ❖ **Mode opératoire**

- Peser  $m_a$  grammes d'amidon du tubercule de manioc.
- Gélifier cet amidon selon mode opératoire cité dans le paragraphe de la gélification.
- Refroidir l'amidon gélifié à une température voulu.
- Ajouter quelques grammes de malt dans la solution, en agitant l'ensemble pendant certain temps.
- A la fin d'hydrolyse, il faut faire le dosage de la solution pour connaitre la teneur en sucres fermentescibles, en opérant à la mode opératoire du dosage par méthode Liqueur de Fehling.

Nous avons dit dans l'étude bibliographique que le malt possède des nombreux enzymes qui peuvent hydrolyser l'amidon et qui demande une zone de pH optimum.

Du fait que nous avons utilisé du papier pH, nous travaillons au pH [5 ; 6] dans toutes les expériences car il y a un point commun sur le pH optimum de chaque enzyme (5,3 à 5,5).

#### V.5.5.2. Hydrolyse enzymatique proprement dite

Le malt obtenu dans le paragraphe sur le maltage, est directement utilisé dans l'hydrolyse enzymatique. Pour cette étape, nous avons pour but d'obtenir un rendement maximum en glucose et nous avons utilisé de l'amidon, de la farine brute et de la farine épuisée du tubercule de manioc. Ceci est effectué sur des petites proportions en laboratoire.

Nous avons dit dans l'étude bibliographique que le malt possède des nombreux enzymes qui peuvent hydrolyser l'amidon et qui demande une zone de pH optimum.

Du fait que nous avons utilisé du papier pH, nous travaillons au pH [5 ; 6] dans toutes les expériences car il y a un point commun sur le pH optimum de chaque enzyme (5,3 à 5,5).

### **V.5.6. Essai d'hydrolyse enzymatique**

#### V.5.6.1. Essai d'hydrolyse d'amidon du tubercule

Dans le but de l'optimisation de l'hydrolyse d'amidon, les trois facteurs cités ci-après sont considérés dans les différents essais :

- le temps

- la variation de charge
- l'agitation.

La charge : c'est la masse en gramme de l'amidon utilisé pendant l'hydrolyse dans 500 ml d'eau distillé.

Par faute de matériel, nous n'avons pas maîtrisé l'agitation de la solution alors que c'est un facteur qu'on doit suivre lors de l'hydrolyse. Pour faire face à ce problème, nous avons fait l'agitation manuellement mais la vitesse de l'agitation n'est pas constante.

o 1<sup>ère</sup> expérience : Variation de la durée d'hydrolyse d'amidon

Nous avons travaillé à des différentes températures en tenant compte la température optimum pour chaque enzyme :

- 55°C pour l'enzyme débranchante : pullulanase et isoamylase,
- 65°C pour le  $\beta$ -amylase : enzyme saccharifiante,
- 72°C pour  $\alpha$ -amylase : enzyme liquéfiante.

Nous avons fait deux essais, en variant le temps 30 minutes et 60 minutes pour chaque palier température. Nous avons fixé la charge (masse d'amidon et volume d'eau distillé).

Tableau 9 : Variation de la durée de l'hydrolyse en fixant la charge.

	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai
Masse d'amidon $m_a$ (g)	50	50
Masse du malt $m_m$ (g)	25	25
Volume d'eau (ml)	500	500
Durée (mn)	<b>30</b>	<b>60</b>

(Source : Auteur)

o 2<sup>ème</sup> expérience : Variation de charge (masse d'amidon dans 500ml d'eau distillé)

Pour cette expérience, nous avons augmenté la charge en travaillant à même température que dans la 1<sup>ère</sup> expérience mais durée d'hydrolyse est maintenu à 60 minutes pour chaque palier de température.

Tableau 10 : Variation de la charge en fixant la durée de l'hydrolyse

Masse d'amidon $m_a$ (g)	100
Masse du malt $m_m$ (g)	25
Volume d'eau (ml)	500

(Source : Auteur)

- 3ème expérience : vérification de l'avancement d'hydrolyse

Pour cette opération, nous avons pris quelques échantillons à chaque fin du travail à température 55°C, 65°C et 72°C pendant 60 minutes pour chacune. Le but de cette opération est de vérifier l'avancement de l'hydrolyse en déterminant la concentration en glucose du moût et de vérifier si on peut éliminer une des températures du palier.

Tableau 11 : Vérification de l'avancement de l'hydrolyse

	1 <sup>er</sup> prélèvement à T=55°C	2 <sup>ème</sup> prélèvement à T=65°C	3 <sup>ème</sup> prélèvement à T=72°C
Masse d'amidon $m_a$ (g)	50		
Masse du malt $m_m$ (g)	25		
Volume d'eau (ml)	500		
Durées (mn)	60	60	60

(Source : Auteur)

- 4ème expérience : la durée

Dans cette partie, la température de travail est de 65°C et la durée est variée de 30 minutes et de 60 minutes. La charge utilisée est donnée par la formule suivante :

$$V = 4 \times m_a$$

V : volume d'eau (ml)

$m_a$  : Masse d'amidon (g)

Tableau 12 : Variation de la durée en travaillant à 65°C et à la charge de 100g/400ml

	1 <sup>ère</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai
Masse d'amidon $m_a$ (g)	100	100
Masse du malt $m_m$ (g)	25	25
Volume d'eau (ml)	400	400
Durées (mn)	30	60

(Source : Auteur)

#### V.5.6.2. Essai d'hydrolyse de la farine brute

Dans cette étape, nous n'avons pas fait l'extraction d'amidon avant la gélification. Nous avons broyé directement les tubercules. Mais pour l'obtention d'une farine à granulométrie fine, nous avons tamisé sur un tamis à 800 $\mu$  de maille.

Pour cette hydrolyse, nous avons choisi comme paramètre :

- charge (masse de farine brute dans 500ml d'eau distillé),
- quantité du malt.
- 5<sup>ème</sup> expérience : Variation de la charge (masse de la farine brute dans 500ml d'eau distillé)

Nous avons travaillé à une température de 65°C pendant une heure, et en augmentant à 72°C pendant une heure encore. Les charges employées sont 50/500 et 100/500 avec 25 g de malt et qui sont présentées dans le tableau 13.

Tableau 13 : Variation de la charge pour l'hydrolyse de la farine brute

	1 <sup>ère</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai
Masse de farine brute (g)	50	100
Masse du malt $m_m$ (g)	25	25
Volume d'eau (ml)	500	500

(Source : Auteur)

- 6<sup>ème</sup> expérience : Variation de la quantité du malt

Nous procédons comme dans la variation de la charge, mais la quantité de malt est de 50g et 100 g.

Tableau 14 : Variation de la quantité du malt durant l'hydrolyse de la farine brute

	1 <sup>ère</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai	3 <sup>ème</sup> essai
Masse de la farine brute (g)	200	400	400
Masse du malt $m_m$ (g)	50	50	100
Volume d'eau (ml)	1000	2000	2000

(Source : Auteur)

#### V.5.6.3. Essai d'hydrolyse de la farine épuisée

Nous allons essayer de faire l'hydrolyse de la farine épuisée que nous avons après l'extraction d'amidon. Le but de cette opération est de trouver s'il existe encore de l'amidon restant dans cette farine.

Nous avons effectué deux opérations pour cette hydrolyse en travaillant à 65 °C et à 72 °C. La durée d'hydrolyse pour chacune des températures est de 60 minutes.

- Le tableau 15 représente la charge d'hydrolyse directe de la farine épuisée dans 500ml d'eau distillé et la quantité du malt.

Tableau 15 : La charge hydrolyse directe de la farine épuisée

Masse de farine épuisée (g)	50
Masse du malt $m_m$ (g)	25
Volume d'eau (ml)	500

(Source : Auteur)

- La farine épuisée est soumise à une nouvelle étape d'extraction d'amidon. Les charges sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 16 : Charge d'hydrolyse de la farine épuisée soumise à une nouvelle extraction d'amidon

Masse de farine épuisée (g)	50
Masse d'amidon retiré (g)	4
Masse du malt $m_m$ (g)	25
Volume d'eau (ml)	500

(Source : Auteur)

Avant de faire le dosage du sucre réducteur et de procéder à la fermentation, on doit filtrer le moût afin d'éliminer les particules en suspension (écorce de malt, dextrines,...) qui sont appelées drêches.



Figure 36 : Drêche issue de l'hydrolyse (source : Auteur)

Nous avons directement utilisé les drêches pour l'alimentation animale.

## **V.6. Fermentation alcoolique**

Il est nécessaire de fermenter rapidement le moût après hydrolyse. La fermentation est une étape clé pour l'obtention d'éthanol grâce à la levure *Saccharomyces cerevisiae* qui transforme les sucres fermentescibles dans le moût.

Nous avons fait des réalisations des fermentations à échelle de laboratoire (petite échelle) avec les solutions obtenues durant l'hydrolyse enzymatique (par maltage).

### **V.6.1. Principe**

La fermentation est une étape clé pour l'obtention d'éthanol grâce à la levure *Saccharomyces cerevisiae* qui transforme les sucres fermentescibles dans le moût en alcool. La fermentation doit être réalisée en milieu anaérobie. Pour cela, on a besoin d'un fermenteur.

### **V.6.2. Description du fermenteur**

On a utilisé comme fermenteur des bouteilles de 1L, 2L. On perce au centre de chaque couvercle des bouteilles pour fixer des tuyaux à l'aide d'une colle plastique (colle bougie). Ces tuyaux sont conduits dans un autre récipient contenant de l'eau, pour suivre le dégagement de CO<sub>2</sub> formé pendant la fermentation tandis que l'oxygène de l'air ne puisse pas entrer dans le fermenteur.



Figure 37 : fermentation du moût (source : Auteur)

### V.6.3. Mode opératoire de la fermentation

- Verser le moût issu d'hydrolyse dans le fermenteur.
- Réactiver la levure et mélanger avec le moût à fermenter (agent de fermentation).
- Ajouter les éléments nutritifs
- Bouchonner le fermenteur

### V.6.4. Agent de fermentation

Pour l'agent de fermentation, nous avons utilisé la levure boulangère sèche « le *Saccharomyces cerevisiae* ». Cette levure est introduite à raison de 4,2 g/L de moût mais nous devons la réactiver pour obtenir une culture vivante et très active avant son introduction dans le moût. Pour cela, il suffit de réhydrater pendant 30 min la levure dans quelques millilitres de moût en agitant jusqu'à la dissolution. La température de réhydratation ne doit pas dépasser 35°C.

### V.6.5. Compositions initiales du moût

La composition initiale du moût est présentée dans le tableau ci-dessous

Tableau 17 : Compositions initiales du moût

Essais / Paramètres	A	B	C
Volume du moût (L)	0,7	1,370	1,470
Concentration en glucose (g/l)	174,29	128,58	128,58
Température	25	25,2	25,2
pH	[5 ; 6]	[5 ; 6]	[5 ; 6]
Levure (g)	2,1	7,56	7,56

(Source : Auteur)

Pour l'essai A, les moûts sont obtenus par hydrolyse de 200g de farine brute dans 1 L d'eau distillé et de 50g de malt.

Pour l'essai B et C, nous avons multiplié deux fois la masse de farine brute à hydrolyser. La quantité de malt est de 50g et 100g.

### V.7. Distillation

La distillation est un procédé de séparation de mélange de substances liquides dont les températures d'ébullition sont différentes. Dans cette opération, nous avons fixé cette température à 80 °C pour la séparation éthanol/eau.

#### V.7.1. Matériels

- Moût fermenté
- Appareil de distillation
- Ballon à fond rond (1 L, 2 L)
- Chauffe ballon
- Thermomètre
- Eprouvette graduée de 1 L

#### V.7.2. Mode opératoire

- Mesurer le volume du moût fermenté
- Verser ce moût dans un ballon à fond rond
- Porter à ébullition le liquide à une température ascendante
- Arrêter le chauffage quand la température affichée sur le thermomètre augmente (dans notre cas la température d'ébullition limite est de 80 °C).



Figure 38 : Distillation (source : Auteur)

### V.7.3. Calcul de la densité, du degré et du rendement de fabrication d'alcool

La densité alcoolique et le rendement de fabrication d'alcool par rapport à la farine sont obtenus par les formules suivantes :

$$d = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0}$$

$m_0$  : masse du pycnomètre vide

$m_1$  : masse du pycnomètre avec le distillat

$m_2$  : masse du pycnomètre avec de l'eau

$d$  : densité

$$r \% = \frac{\text{masse de produit obtenue}}{\text{masse de farine initial}} \times 100$$

$r \%$  : rendement de fabrication d'alcool par rapport à la farine en pourcent

Pour connaître le degré d'alcool obtenu après la distillation, nous calculons la densité du distillat et nous référons sur hand book (voir annexe N°2).

## Chapitre VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### VI.1. L'extraction d'amidon

#### ➤ Tubercule fraîche

Pour l'extraction d'amidon du tubercule fraîche, nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau ci-après.

Tableau 18 : Résultats de l'extraction d'amidon à partir du tubercule fraîche

	Masse du tubercule non épluché (g)	Masse d'amidon humide (g)	Masse d'amidon sec (g)	Rendement d'extraction (%)
1 <sup>ère</sup> extraction	2989	405	230	7,695
2 <sup>è</sup> extraction	1613	394	260	16,119
3 <sup>è</sup> extraction	1577	309	240	15,218
4 <sup>è</sup> extraction	2045	502	306	14,963
5 <sup>è</sup> extraction	1625	314	275	16,923
Moyenne	1969,8	384,8	262,2	13,310
TOTAL	9849	1924	1311	13,310

(Source : Auteur)

### Interprétation

D'après le tableau ci-dessus, nous avons remarqué que le rendement de la 1<sup>ère</sup> extraction (2989g) qui est de 7,695%, est très inférieur par rapport aux autres extractions alors que la moyenne est de 13,310%. Cela est dû à une perte lors de l'épluchage suivi du râpage et à la quantité d'eau utilisée durant l'opération de tamisage.

Nous avons remarqué que quelques quantités d'amidon restent sur la surface du filtre ou « *lamba sogá* ».

#### ➤ Tubercule sec

Le tableau 19 représente les résultats d'extraction d'amidon à partir du tubercule sec.

Tableau 19 : Résultats de l'extraction d'amidon à partir du tubercule sec

	Masse du tubercule non épluché (g)	Masse d'amidon humide (g)	Masse d'amidon sec (g)	Rendement d'extraction (%)
1 <sup>ère</sup> extraction	1096	372	226	20,620
2 <sup>è</sup> extraction	1028	311	216	21,011
3 <sup>è</sup> extraction	998	275	186	18,637
4 <sup>è</sup> extraction	997	269	181	18,154
Moyenne	1029,75	306,75	202,25	19,640
TOTAL	4119	1227	809	19,640

(Source : Auteur)

### **Interprétation**

En se référant au résultat de l'extraction d'amidon à partir du tubercule fraîche qui a une moyenne de rendement d'extraction de 13,310%, nous avons une augmentation de rendement de 19,640 lors de l'extraction à partir du tubercule sec. L'opération de râpage est la même lors de la manipulation mais pour le tubercule sec, nous obtenons une pulpe très fine. C'est-à-dire que la surface de contact de la pulpe du tubercule sec avec l'eau de lavage est assez petite par rapport à celle de manioc frais. Ce qui facilite la libération d'amidon.

### **VI.2. Humidité**

Pour l'humidité, nous avons utilisé de quelques abréviations :

- $m_0$  : masse de la capsule vide (en gramme)
- $m_1$  : masse de la capsule munie de l'échantillon avant étuvage (en gramme)
- $m_2$  : masse de la capsule munie de l'échantillon après étuvage (en gramme)
- H % : humidité d'amidon (en pourcent)
- MS % : matière sèche (en pourcent)
- Amidon du tubercule fraîche

L'humidité de l'amidon obtenu à partir du tubercule fraîche est présentée dans le tableau 20.

Tableau 20 : L'humidité de l'amidon à partir du tubercule fraîche

	m <sub>0</sub> (g)	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	H %	MS %
1 <sup>er</sup> essai	41,372	46,375	45,709	13,312	86,688
2 <sup>e</sup> essai	38,531	43,536	42,863	13,446	86,554
<b>MOYENNE</b>				13,379	86,621

(Source : Auteur)

### Interprétation

L'humidité moyenne de l'amidon à partir du tubercule fraîche est un peu élevée mais qui ne dépasse pas l'humidité maximale (14% pour la norme américaine) car la température varie beaucoup durant l'opération de séchage qui n'est pas adéquat (séchage au soleil).

➤ Malt

Tableau 21 : L'humidité du malt issu de la germination après séchage

	m <sub>0</sub> (g)	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	H %	MS %
1 <sup>er</sup> essai	41,372	46,372	41,899	9,487	90,513
2 <sup>e</sup> essai	38,531	43,532	39,064	9,382	90,618
<b>MOYENNE</b>				9,434	90,565

(Source : Auteur)

### Interprétation

L'humidité moyenne est de 9,434 % qui ne dépassent pas la limite où il y a un risque de prolifération des micro-organismes.

### VI.3. Résultats de l'hydrolyses

#### VI.3.1. Résultats d'hydrolyse acide d'amidon

Les résultats de l'hydrolyse acide de l'amidon sont regroupés dans le tableau ci-dessous, en montrant les concentrations en glucose et les rendements d'hydrolyse.

Tableau 22 : Evolution de la concentration en glucose durant l'hydrolyse acide d'amidon

	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai	3 <sup>ème</sup> essai
Masse d'amidon	5	5	50
Volume final ( $V_f$ en ml)	500	500	500
Concentration en glucose (g/l)	7,143	7,858	64,29
Masse de glucose (g)	3,571	3,929	32,145
Rendement d'hydrolyse (%)	71,42	78,58	64,29

(Source : Auteur)

#### Interprétations

Si on compare le rendement du 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> essai, on constate qu'il n'y a pas une grande différence de rendement même si on avait prolongé la durée de l'hydrolyse du 2<sup>ème</sup> essai. Le rendement maximal de l'hydrolyse acide de 5g d'amidon est environ de 78.58%.

On constate aussi une diminution du rendement d'hydrolyse du 3<sup>ème</sup> essai après avoir augmenté la charge (50 g d'amidon dans 500 ml d'eau distillé). Nous pouvons dire que l'action de l'acide comme catalyseur est très faible pour briser les chaînes de l'amylose et de l'amylopectine de l'amidon pour cette augmentation de la masse d'amidon.

#### VI.3.2. Résultats de l'hydrolyse enzymatique

##### VI.3.2.1. Essai d'hydrolyse d'amidon

#### 1<sup>ère</sup> expérience : Evolution de la concentration en glucose formés pour la variation de la durée

Les résultats de l'hydrolyse d'amidon en variant la durée sont présentés dans le tableau 23.

Tableau 23 : Evolution de la concentration en glucose pour la variation de la durée.

	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai
Masse d'amidon (g)	50	50
Durée à chaque palier de température (mn)	30	60
Volume final (V <sub>f</sub> en ml)	600	600
Concentration en glucose (g/l)	39,26	50
Masse du sucre réducteur (g)	23,574	30
Rendement d'hydrolyse (%)	47,148	60

(Source : Auteur)

### **Interprétations**

On constate que le rendement d'hydrolyse passe de 47,148% à 60% si la durée de travail pour chaque palier est augmentée.

Nous pouvons dire d'après les résultats présentés dans le tableau 23 que la durée de 60 minutes pour chaque palier nous donne un meilleur rendement durant l'hydrolyse.

Le rendement de transformation d'amidon en glucose est de 60% qui sont proche de la valeur obtenu durant l'opération de l'hydrolyse acide de l'amidon (64,29%).

### **2<sup>ème</sup> expérience : Evolution de la concentration en glucose formés pour la variation de la charge (variation de la masse d'amidon dans 500ml d'eau distillé)**

Les résultats de la variation de la concentration en glucose pour la variation de la charge (variation de la masse d'amidon dans 500 ml d'eau distillé sont présentés dans le tableau 24.

Tableau 24 : Evolution de la concentration en glucose pour la variation de la charge

Masse d'amidon (g)	100
Durée à chaque palier de température (mn)	60
Volume final (ml)	600
Concentration en glucose (g/l)	92,86
Masse de glucose(g)	55,716
Rendement d'hydrolyse (%)	55,716

(Source : Auteur)

## Interprétations

D'après le tableau 24, l'hydrolyse enzymatique pour la charge de 100 g d'amidon dans 500 ml, donne une valeur de la concentration en glucose de 92,86 g/l qui est proche à celui de ANDRIAMANTANTSOA (2013), qui travaillait avec la charge de 100 g/400 ml) durant l'hydrolyse à base d'orge germée, en obtenant une concentration en glucose de 98,8 g/l, en fixant la durée à 30 min, à pH 5.4 et la température de 62 °C.

Le rendement d'hydrolyse obtenu est aussi proche à ceux des auteurs RAKOTOSAONA et ANDRIANONINTSOA (1999) qui ont eu des résultats de 51,68% avec une charge de 150 g/750 ml et de 53,83% avec 200 g/1000ml.

### 3<sup>ème</sup> expérience : Résultats de la vérification de l'avancement de l'hydrolyse

Le tableau ci-dessous représente les résultats obtenus lors de la vérification de l'avancement de l'hydrolyse

Tableau 25 : Evolution de la concentration en glucose lors de la vérification de l'avancement de l'hydrolyse

	1 <sup>er</sup> prélèvement à T=55°C	2 <sup>ème</sup> prélèvement à T=65°C	3 <sup>ème</sup> prélèvement à T=72°C
Masse d'amidon (g)	50		
Durée à chaque palier de température (mn)	60		
Volume final (V <sub>f</sub> en ml)	600	600	600
Concentration en glucose (g/l)	50	50	64,29
Masse de glucose (g)	30	30	38,574
Rendement d'hydrolyse (%)	60	60	77,148

(Source : Auteur)

## Interprétations

Pour le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> prélèvement, on constate que les rendements d'hydrolyse obtenus à la fin du travail pendant 60 minutes à chaque température 55 °C et 65 °C, sont les mêmes (60%). La concentration en glucose ne change pas. On peut dire alors que

toutes les liaisons qui doivent être coupées durant l'hydrolyse enzymatique à une température de 65 °C, sont déjà coupées pendant la manipulation à une température de 55 °C.

Mais si on continue encore l'hydrolyse à 72 °C, il y a une augmentation du rendement jusqu'à 77,148%. Cette température de 72 °C est la température optimale d'activation de l'  $\alpha$  -amylase qui est capable de coupé la liaison  $\alpha(1-4)$  de l'amylose.

D'après ces résultats, on peut conclure qu'il sufi de travailler à deux palier de température. Pour la suite de l'opération, on travaille à 65 °C et 72 °C.

#### **4<sup>ème</sup> expérience : Evolution de la concentration en glucose pour la variation de la durée d'hydrolyse de la charge (V=4ma)**

Les résultats de l'hydrolyse d'amidon en variant la durée d'hydrolyse de la charge obtenue par la relation  $V=4m_a$ , sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 26 : Evolution de la concentration en glucose pour la variation de la durée en fixant la charge (V=4ma)

	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai
Masse d'amidon	100	100
Durée	30	60
Volume final (V <sub>f</sub> en ml)	500	500
Concentration en glucose (g/l)	92,86	100
Masse de glucose (g)	46,43	50
Rendement de l'hydrolyse (%)	46,43	50

(Source : Auteur)

#### **Interprétations**

Pour cette opération, on obtient une concentration en glucose de 92,86 g/l si on travaille pendant 30 mn et 100 g/l pendant 60mn. Ces deux valeurs sont proche de la valeur trouvée ANDRIAMANTANTSOA (2013), qui travaillait de même charge et a obtenu une concentration en glucose de 98,8 g/l.

On constate aussi que le rendement d'hydrolyse augmente si on prolonge la durée du travail (30minutes vers 60 minutes).

#### VI.3.2.2. Résultats d'hydrolyse de la farine brute

#### **Evolution de la concentration en glucose en variant la charge (masse de la farine brute dans 500ml d'eau distillé)**

Les résultats de l'hydrolyse pour la variation de la masse de la farine brute dans 500ml d'eau distillé sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 27 : Résultats de l'hydrolyse de la farine brute en variant la charge

	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai
Masse de la farine brute (g)	50	100
Volume final ( $V_f$ en ml)	600	600
Concentration en glucose (g/l)	50	85,72
Masse de glucose (g)	30	51,432
Rendement de l'hydrolyse (%)	60	51,432

(Source : Auteur)

#### **Interprétations**

Si on compare les rendements d'hydrolyse de la farine brute dans le tableau27 avec les rendements obtenus dans l'hydrolyse de l'amidon en utilisant comme charge : 50 g et de 100 g d'amidon, on constate que les rendements sont presque identiques.

On constate aussi que l'hydrolyse de la charge de 100 g de la farine brute dans 500 ml d'eau distillé en obtenant du rendement d'hydrolyse de 51,432%, est inférieur à celui du de l'hydrolyse de 50 g de la farine brute dans 500ml d'eau distillé qui a un rendement de 60%. Cette faible valeur est due à l'action de l'enzyme qui n'est pas assez forte pour hydrolyser la charge à une concentration plus élevée.

#### **Evolution de la concentration en glucose en variant la quantité du malt durant l'hydrolyse de la farine brute**

Les résultats de l'hydrolyse de la farine brute en variant la quantité de malt, sont présentés dans le tableau 28.

Tableau 28 : Résultats de l'hydrolyse de la farine en utilisant des différentes quantités de malt

	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai	3 <sup>ème</sup> essai
Masse de la farine brute (g)	200	400	400
Masse du malt (g)	50	50	100
Volume finale (ml)	700	1800	1800
Concentration en glucose (g/l)	174,29	128,58	128,58
Masse de glucose (g)	122,003	231,444	231,444
Rendement d'hydrolyse (%)	61	57,861	57,861

(Source : Auteur)

### **Interprétations**

Si on compare le rendement d'hydrolyse du 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> essai, on constate que le rendement du 1<sup>er</sup> essai est le plus élevé avec un rendement d'hydrolyse de 61%.

Nous avons aussi du même rendement d'hydrolyse 57,861% pour les hydrolyses de 400 g de la farine brute dans 2 L d'eau distillé alors que nous avons augmenté la quantité du malt pour le 3<sup>ème</sup> essai.

#### VI.3.2.3. Résultat d'hydrolyse de la farine épuisée

Les tableaux 29 et 30 représentent les résultats obtenus durant l'hydrolyse de la farine épuisée.

### **Evolution de la concentration en glucose pendant l'hydrolyse de la farine épuisée**

Tableau 29 : Evolution de la concentration en glucose de l'hydrolyse de la farine épuisée

Masse de la farine épuisée (g)	50
Volume final (ml)	600
Concentration en glucose (g/l)	48,215
Masse de sucre (g)	28,929
Rendement d'hydrolyse (%)	57,85

(Source : Auteur)

## **Evolution de la concentration en glucose formé pendant l'hydrolyse de la farine épuisée après une deuxième extraction d'amidon**

Tableau 30 : Résultats de l'hydrolyse de la farine épuisée en procédant une autre extraction d'amidon

Masse de la farine épuisée- masse d'amidon (g)	46
Volume final (ml)	600
Concentration en glucose (g/l)	42,86
Masse de glucose (g)	25,716
Rendement d'hydrolyse (%)	51,432

(Source : Auteur)

### **Interprétations**

On constate que la farine épuisée obtenue après extraction d'amidon contient encore de l'amidon. Ce qui est justifié par la présence de la concentration en glucose (48,215g/l et 42,86 g/l) lors de l'hydrolyse de la farine épuisée.

#### **VI.4. Résultats de fermentation**

Nous avons pris de quelques échantillons pour mesurer la densité et la température durant la fermentation.

##### **VI.4.1. Evolution de la densité**

Le tableau 31 représente les résultats de la détermination de la densité du moût par jour pendant la fermentation.

- Pour essai B

Tableau 31 : Evolution de la densité de l'essai B

Temps de fermentation (jours)	Densité
1	1,0079
2	1,0043
3	0,9914
4	0,9844
5	0,9794
6	0,9763
7	0,9735
8	0,9718

(Source : Auteur)

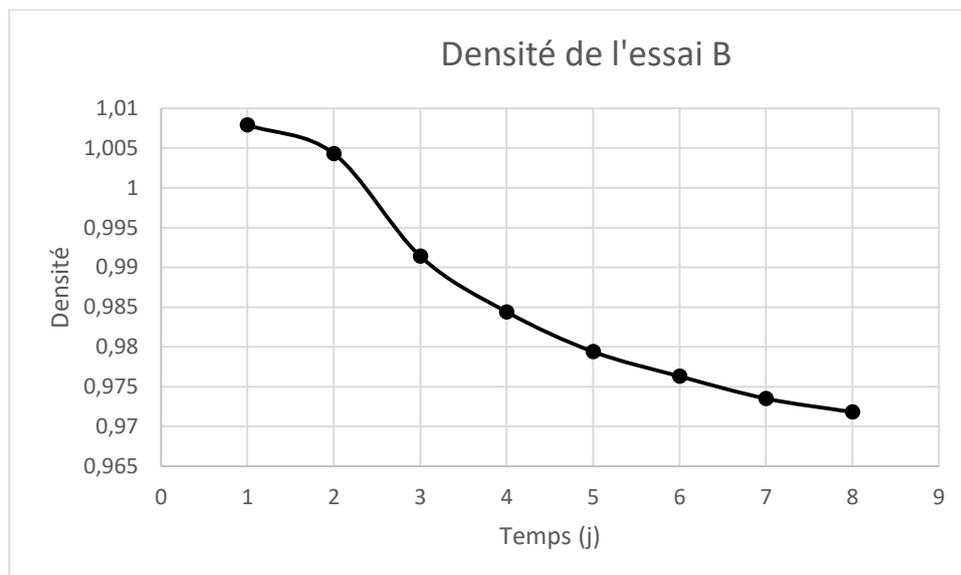


Figure 39 : Courbe de l'évolution de la densité pour essai B (source : Auteur)

- Pour essai C

L'évolution de la densité de moût par jour durant la fermentation est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 32 : Evolution de la densité de l'essai C

Temps de fermentation (jours)	Densité
1	1,0086
2	1,005
3	0,9927
4	0,9847
5	0,9787
6	0,9736
7	0,9721

(Source : Auteur)

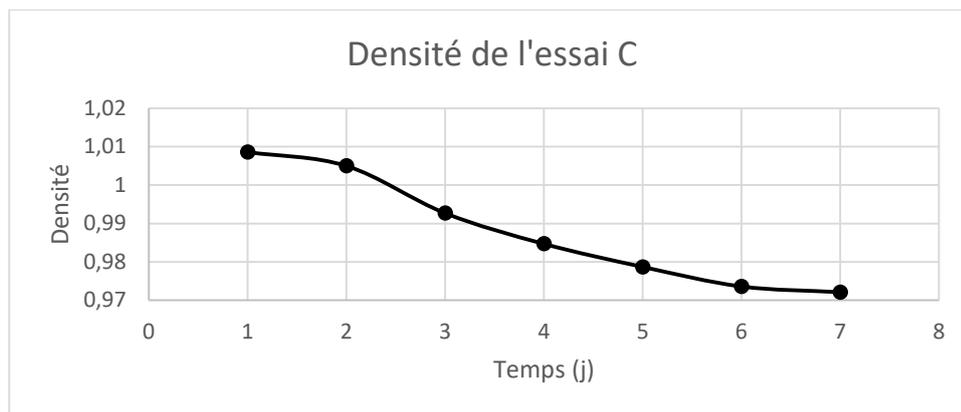


Figure 40 : Evolution de la densité de l'essai C (source : Auteur)

### Interprétations

D'après les figures 39 et 40, on constate une diminution progressive de la densité du moût à partir du deuxième jour. Ceci est dû à la transformation du glucose en alcool.

On peut dire alors qu'au cours de la fermentation, la quantité du sucre diminue mais il se forme de l'alcool.

La diminution de la densité au deuxième jour de fermentation aussi justifie l'augmentation de la vitesse de la fermentation.

#### **VI.4.2. Evolution de température**

Les résultats de la détermination de la température du moût par jour pendant la fermentation sont représentés dans les tableaux 33 et 34.

Tableau 33 : Température de l'essai B

Temps de fermentation (jours)	Température (°C)
1	25,1
2	25,4
3	25,8
4	25,3
5	25
6	24,8
7	25
8	24,9

(Source : Auteur)

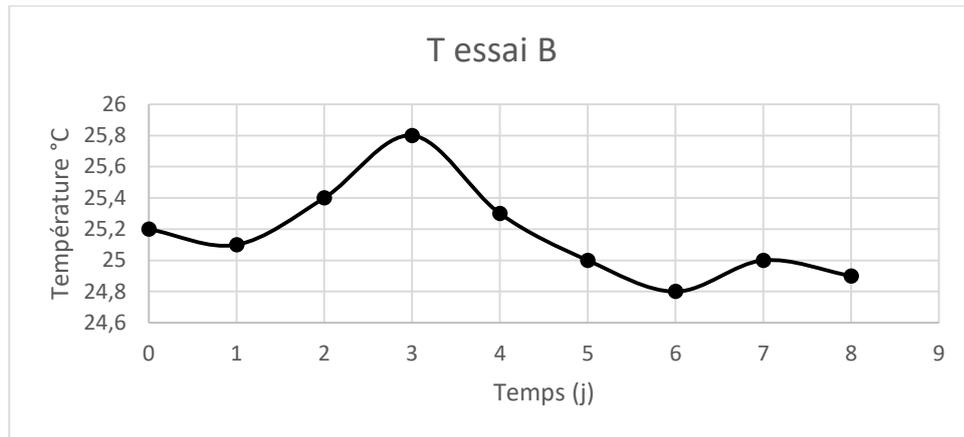


Figure 41 : Courbe d'évolution de la température pour essai B (source: Auteur)

Tableau 34 : Température de l'essai C

Temps de fermentation (jours)	Température (°C)
0	25,2
1	25,2
2	25,4
3	25,7
4	25
5	24,8
6	24,8
7	24,7

(Source : Auteur)

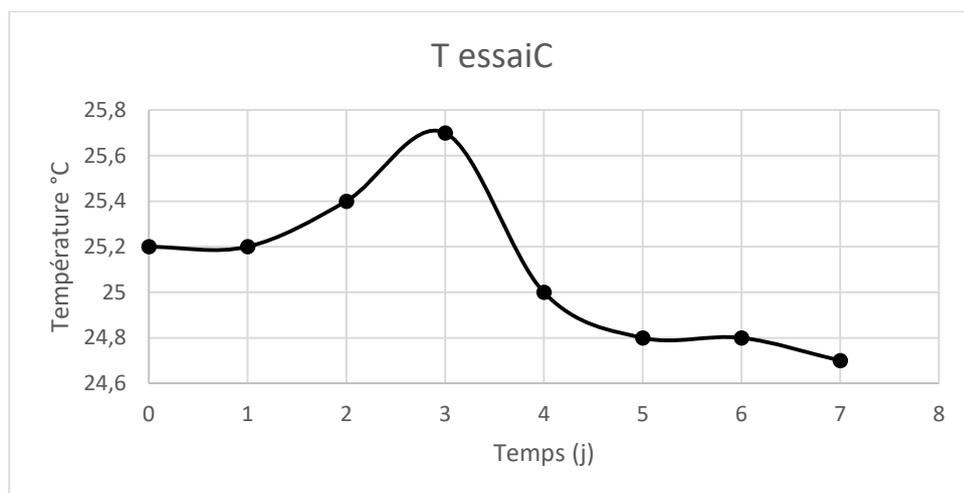


Figure 42 : Courbe d'évolution de la température pour essai C (source : Auteur)

## **Interprétations**

Durant les deux fermentations, il n'y a pas de changement de température remarquable car la différence entre le maximum et le minimum est d'ordre de 1 °C.

Normalement, la température devrait augmenter car c'est une réaction exothermique. Mais comme notre fermenteur est en plastique de contour fine et assez petit, le transfert de chaleur avec le milieu ambiant se fait rapidement.

### **VI.5. Résultats de la distillation**

Le tableau 35 représente les résultats obtenus durant la distillation.

Tableau 35 : Résultats de la distillation

	Volume initial du moût (ml)	Volume du distillat (ml)	Densité du distillat	°GL d'alcool	Rendement de la fabrication d'alcool par rapport à la farine (%)
Essai A	500	37	0,8457	85	18,61
Essai B	1370	20	0,8742	75	4,237
Essai C	1470	20	0,8745	75	4,894

'Source : Auteur)

## **Interprétations**

D'après le tableau ci-dessus, on constate que le rendement de la fabrication d'alcool par rapport à la farine de l'essai B et l'essai C sont presque les mêmes et qui sont très bas. Cela peut être dû à la mal fonctionnement de la fermentation. Mais pour l'essai A, le rendement de fabrication d'alcool par rapport à la farine est un peu élevé par rapport au deux autres essais.

## CONCLUSION

Le manioc est classé parmi les produits amylacés ayant de fortes potentialités en agro-alimentaire et industrielles. C'est une plante en abondance à Madagascar car il est facile à cultiver et s'adapte à l'écologie de notre pays. Le tubercule de manioc renferme de l'amidon qui peut être utilisé comme source de glucose et nous pouvons le valoriser en fabriquant de l'éthanol comme toutes les autres plantes sucrées car l'éthanol est un produit très recherché de nos jours, son utilisation ne cesse pas de se multiplier comme alcool de bouche, alcool pharmaceutique, ...

Nous nous adaptons à l'échelle de laboratoire pour produire de l'éthanol à partir des tubercules de manioc. Le tubercule subit deux opérations avant d'être utilisé comme matière première : l'une c'est l'extraction d'amidon et l'autre le broyage direct de tubercule pour obtenir de la farine. Les étapes de fabrication à suivre sont les mêmes en commençant par la gélification de la farine et amidon, l'hydrolyse enzymatique, la fermentation jusqu'à l'obtention de l'éthanol après distillation.

Le procédé de distillation nous a permis d'obtenir 85 °GL avec un rendement d'éthanol de 18,61 % ; 75 °GL avec un rendement d'éthanol de 4,237 % et de 4.894 %. Les résultats que nous avons obtenus, ne sont pas rentables et non satisfaisants, mais encourageants.

Nous envisagerons dans l'avenir : d'approfondir un peu plus sur cette étude et d'améliorer les techniques de production, de rechercher des paramètres qui nous conduisent à une hydrolyse totale de l'amidon et d'installer une unité de production d'éthanol.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ANDRIANANTENAINA Tanteliniaina Berson Edinah. "Projet de production d'éthanol à partir de la farine de manioc, dans le District de Maevatanana, Région BETSIBOKA", Mémoire de Maitrise en Gestion, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2008.
- [3] GIRAUD, Eric. "Contribution à l'étude physiologique et enzymatique d'une nouvelle souche de *Lactobacillus plantarum* amylolytique isolée du manioc fermenté". Thèse du grade de Docteur en Sciences. UNIVERSITE DE PROVENCE AIX-MARSEILLE, 1993.
- [4] ANDRIAMANANTSOA Ainavalonjaka. "Fabrication de bioéthanol à partir d'amidon de manioc et étude des facteurs influant sur l'hydrolyse enzymatique de l'amidon". Mémoire de Master II en Faculté des sciences, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO 2017.
- [5] RANOVONA Zoelinoronirina. "Caracteristiques nutritionnelles, capacité antioxydante et facteurs antinutritionnels de quelques légumes feuilles Malagasy". Mémoire du D.E.A. de Sciences de la vie, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2012.
- [6] YOUSSEUF: Bakari Mdahoma. "Contribution à la maîtrise de techniques de la culture in vitro de manioc (*Manihot esculenta Crantz*) en vue de la sélection de lignées indemnes de virus de la mosaïque du manioc (*Cassava Mosaic Disease*)". Mémoire de Master en Biologie, Faculté des Sciences, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2015.
- [8] Sekou Aïdara. "Aperçu sur la culture de manioc et étude du système racinaire du manioc (variété CB) suivant le système de coupedes boutures et le mode de planting". 1984.
- [9] EGLE Komi. "Etude de la variabilité des composants du rendement du manioc (*Manihot esculenta Crantz*, var. 312-524) en fonction de la fertilité du sol". Mémoire d'ingénieur Agronome, UNIVERSITE DU BENIN, 1992.

- [10] AKPINGNY KANGA LEA Epse DALI et KOULOU NAZARETTE Epse YOBOUA. "Fiche technico-économique du MANIOC". 2017.
- [11] ASIÉDU J. "La transformation des produits agricoles en zone tropicale. Approche technologique, 4ème édition". Technique et Documentation – Lavoisier Paris 1993.
- [12] RANDRIAMANGA ANDONIRINA Cathérine Jane Rica. "Contribution à la valorisation du manioc (*Manihot esculenta*) : essais de fabrication de bière au manioc". Mémoire du D.E.A. en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, ESPA, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO. 2014.
- [13] FAO : Organisation des Nations-unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. "Produire plus avec moins : Le manioc Guide pour une intensification durable de la production". 2013.
- [14] RAKOTOMAHEFA Mamy Natacha. "Contribution à la production d'éthanol à partir de l'amidon de manioc par hydrolyse enzymatique". Mémoire de Master II Recherche en Chimie, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2019.
- [15] Seyed Amir Bahrani. "Modification des Propriétés Physico-Chimiques de l'amidon par procédés hydrothermiques : Contribution à l'étude des transferts couplés chaleur-masse". Thèse pour grade de Docteur en Génie des Procédés, UNIVERSITE DE LA ROCHELLE 2013.
- [16] ANTUYA Ahamada Mravoreha. "Contribution à la valorisation de substances fermentescibles : cas du manioc et du fruit à pain". Mémoire du D.E.A. en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, ESPA, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2007.
- [17] TAWIL Georges. "Compréhension et modélisation des mécanismes physico-chimiques impliqués lors de l'hydrolyse enzymatique de l'amidon natif". Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et des Techniques, UNIVERSITE DE NANTES 2011.
- [18] MAKTOUF Sameh. "Activités amylase et lichenase d'une nouvelle souche de *Bacillus* Production sur milieu solide et caractérisation". Thèse de Doctorat en Ingénieries Microbienne et Enzymatique, UNIVERSITE DE TOULOUSE, 2013.

- [19] RAKOTOSAONA Rijalalaina et ANDRIANONINTSOA Tolojanahary. "Etude des amyloses : hydrolyse et fermentation ; Application : fabrication de boisson alcoolisée". Mémoire d'Ingénieur en Génie Chimique, ESPA, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 1999
- [20] Sihem BEN HAJ. "Nanoparticules d'amidon : préparation, pouvoir renforçant et utilisation comme agent de stabilisation". Thèse Doctorat de l'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES, 2015 .
- [21] BAOARIMANDIMBY Lanto Vetsoarisoa. "Contribution à la valorisation de l'igname Malgache *Dioscorea seriflora* : transformation en farine, hydrolyse enzymatique de l'amidon et fermentation alcoolique par la levure *Saccharomyces cerevisiae*". Mémoire du D.E.A. en Biotechnologie - Microbiologie de la Faculté des Sciences, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2004.
- [22] BENDALI Abdelaziz. "Production d'un sirop de glucose par hydrolyse acide et enzymatique de l'amidon de maïs et obtention du sorbitol par hydrogenation catalytique". Mémoire de Magister en Génie des procédés, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA, 2005.
- [23] HOLIHARIMANANA Domoina Fanomezana. "Préparation de biocarburant de deuxième génération à partir de déchets végétaux et étude cinétique de la fermentation". Mémoire du D.E.A. en Chimie , Faculté des Sciences, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2013.
- [24] RANDRIAMANANTENA Andriamasina Herivelo. "Valorisation de l'igname malgache *Dioscorea sansibarensis* variété « veoveo » : hydrolyse enzymatique de l'amidon et fermentation alcoolique par la levure *Saccharomyces cerevisiae*". Mémoire du D.E.A. de Biochimie, Faculté des Sciences, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2006.
- [25] SCRIBIN R. (Coordonateur) "Biotechnologie 4ème édition". Editeur Tech.doc, Condé-sur-noireau France 1993.
- [26] ALFA MANANIRINA Harinaivo Donat. "Contribution à la valorisation de *Tacca leontopetaloides* comme éthanol combustible". Mémoire du D.E.A. en Chimie

Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, ESPA, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2010.

- [27] PHARLIN Solofoandriaina. "Etudes des conditions d'obtention de vin de fermentation – conception d'une cuve d'hydrolyse et d'une cuve de fermentation". Mémoire d'Ingénieur en Génie Chimique, ESPA, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO 2003.
- [28] RANDRIANAIVOARISOA Rolland. "Contribution à la valorisation des tubercules de *Dioscorea sansibarensis* ou « Rangitrika » par hydrolyse enzymatique et par fermentation alcoolique". Mémoire du D.E.A. en Biochimie, Faculté des Sciences, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2006.
- [29] TAHINJANAHARY Fetimamy. "Contribution à la valorisation de patate douce pour la production d'alcool". Mémoire du D.E.A. en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, ESPA, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2014.
- [30] SCRIBAN R. "Industries Agricoles et Alimentaires : Progrès des sciences et techniques", Technique et Documentation, Lavoisier. 1988.
- [31] KONAN Amani Hermann. "Alteration microbienne des boissons". Mémoire de Master en Science et Technologies des aliments, UNIVERSITE NANGUI ABROBOUA, 2016.

## REFERENCES WEBOGRAPHIQUES

- [2] [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Manioc>. [Accès le 07 Août 2021].
- [7] [En ligne]. Available: <https://www.africmemoire.com/part.3-chapitre-i-generalites-sur-le-manioc-1043.html>. [Accès le 5 Août 2021].

# ANNEXE

## Annexe N°1

Préparation des réactifs pour faire le dosage du sucre réducteur

Solution A de liqueur de Fehling : 40 g de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  + 1000ml d'eau distillé +  
2 gouttes  $\text{H}_2\text{SO}_4$

Solution B de liqueur de Fehling : 200 g de tartrate neutre de sodium et de  
potassium + 150g NaOH + 1000ml d'eau distillé

Solution étalon de glucose :  
5 g de glucose dans 1000ml d'eau distillé  
10 g de glucose dans 1000ml d'eau distillé  
15 g de glucose dans 1000ml d'eau distillé



Figure 43 : Solution avant et après dosage (source : Auteur)

## **Annexe N°2**

Tableau 36 : Table donnant le degré alcoométrique en fonction de la densité

Degrés d'alcool (°GL)	Densité
50	0,9318
55	0,9216
60	0,9112
65	0,8992
70	0,8871
75	0,8743
80	0,8608
85	0,8464
90	0,8306
95	0,8128

(Source : TAHINJANAHARY)

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT .....	i
SOMMAIRE.....	iii
GLOSSAIRE.....	iv
LISTE DES UNITES.....	v
LISTE DES ABREVIATIONS.....	vi
LISTE DES FIGURES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	ix
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I. ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES.....	2
Chapitre I. GENERALITES SUR LE MANIOC .....	3
I.1. Historiques et origine du manioc.....	3
I.2. Position systématique de la plante.....	3
I.3. Description botanique de la plante.....	4
I.3.1. Racines .....	4
I.3.2. Tiges.....	5
I.3.3. Feuilles .....	6
I.3.4. Inflorescences .....	6
I.3.5. Fleurs .....	6
I.3.6. Fruits .....	7
I.3.7. Graines.....	8
I.4. Répartition de la productivité du manioc .....	8
I.5. Ecologie de la plante.....	9
I.5.1. Température.....	9
I.5.2. Eclaircissement .....	9
I.5.3. Régime hydrique .....	9

I.5.4.	Facteurs édaphiques .....	9
I.6.	Phases végétatifs de la plante de manioc.....	9
I.6.1.	Phase de reprise .....	9
I.6.2.	Phase d'installation.....	10
I.6.3.	Phase de développement foliaire .....	10
I.6.4.	Phase d'accumulation des réserves .....	10
I.6.5.	Phase de repos .....	10
I.6.6.	Seconde phase de développement foliaire.....	10
I.6.7.	Seconde phase d'accumulation des réserves .....	10
I.6.8.	Seconde phase de repos.....	10
I.7.	Répartition géographique.....	10
I.8.	Principaux constituants chimiques .....	10
I.9.	Diverses utilisations de la plante.....	11
I.9.1.	Alimentation humaine .....	12
I.9.2.	Alimentation animale .....	13
I.9.3.	Utilisations industrielles .....	14
Chapitre II.	GENERALITES SUR L'AMIDON .....	15
II.1.	Définitions .....	15
II.2.	Structures d'amidon .....	15
II.2.1.	Structures physiques.....	15
II.2.2.	Structures chimiques.....	17
II.2.2.1.	L'amylose.....	17
II.2.2.2.	L'amylopectine .....	17
II.3.	Caractéristiques de l'amidon des tubercules de manioc .....	18
II.4.	Procédé d'extraction d'amidon.....	18
II.4.1.	Nettoyage .....	19
II.4.2.	Epluchage .....	19

II.4.3.	Râpage ou broyage .....	20
II.4.4.	Fermentation .....	20
II.4.5.	Tamisage.....	20
II.4.6.	Sédimentation .....	20
II.4.7.	Séchage .....	21
II.4.8.	Sassage .....	21
II.5.	Modification par chauffage de l'amidon ou gélification.....	21
II.6.	Usage industrielle de l'amidon .....	22
Chapitre III. ETUDE THEORIQUE DE LA FABRICATION DE L'ETHANOL.....		23
III.1.	DIAGRAMME DE PROCEDE DE FABRICATION D'ETHANOL .....	23
III.2.	HYDROLYSE.....	24
III.2.1.	Définitions.....	24
III.2.2.	Types d'hydrolyse .....	24
III.2.2.1.	Hydrolyse acide.....	24
III.2.2.2.	Hydrolyse enzymatique.....	25
III.2.2.3.	Hydrolyse acido-enzymatique .....	27
III.2.3.	Comparaisons des types d'hydrolyse.....	28
III.2.4.	Mise en œuvre de l'hydrolyse.....	28
III.2.5.	Produit d'hydrolyse partiel ou total selon le type d'enzyme utilisé et ses usages .....	29
III.3.	FERMENTATION ALCOOLIQUE .....	30
III.3.1.	Définition .....	30
III.3.2.	Mécanisme réactionnel de la fermentation alcoolique.....	31
III.3.3.	Agents de fermentation : la levure.....	32
III.3.3.1.	Définition de la levure .....	32
III.3.3.2.	Classification systématique de la levure .....	32
III.3.3.3.	Propriétés des levures .....	32

III.3.3.4. Milieu de culture de la levure.....	33
III.3.4. Paramètre de la fermentation .....	33
III.3.4.1. Teneur en substrat carboné .....	33
III.3.4.2. Teneur en oxygène .....	33
III.3.4.3. Température.....	34
III.3.4.4. pH .....	34
III.3.4.5. Agitation .....	34
III.3.5. Produit de la fermentation .....	34
III.3.5.1. Produit principale .....	34
a. Ethanol .....	34
b. Gaz carbonique .....	35
III.3.5.2. Produit secondaires .....	35
a. Glycérol .....	35
b. Méthanol.....	35
c. Alcools supérieurs .....	35
d. Esters .....	36
e. Acide succinique.....	36
f. Acide acétique .....	36
III.3.6. Usage de l'alcool .....	36
III.4. DISTILLATION.....	36
III.4.1. Distillation simple.....	37
III.4.2. Distillation fractionnée .....	37
Chapitre IV. GENERALITES SUR LES BOISSONS ALCOOLISEES .....	38
IV.1. Généralités sur l'alcool .....	38
IV.1.1. Définitions et utilisations .....	38
IV.1.2. Classification de l'alcool .....	38
IV.2. Historique .....	39

IV.3.	Définitions.....	40
IV.4.	Différentes sortes de boisson alcoolisées.....	40
IV.4.1.	Boissons à partir du jus sucré .....	40
IV.4.2.	Boisson à partir des matières amylacées .....	40
IV.5.	Technique de fabrication .....	41
IV.5.1.	Le vin.....	41
IV.5.2.	La bière .....	42
IV.5.3.	Autres boissons alcoolisées .....	43
PARTIE II. ETUDES EXPERIMENTALES.....		44
Chapitre V.  MATERIELS ET METHODES .....		45
V.1.	MATIERE PREMIERE .....	45
V.2.	DIAGRAMME DE PROCEDE DE FABRICATION .....	45
V.3.	EXTRACTION D'AMIDON .....	46
V.3.1.	Diagramme de procédé d'extraction d'amidon .....	46
V.3.2.	Extraction d'amidon.....	47
V.3.2.1.	Matériels .....	47
V.3.2.2.	Mode opératoire.....	47
V.3.3.	L'humidité d'amidon et pourcentage de la matière sèche.....	48
V.3.3.1.	Principe.....	48
V.3.3.2.	Matériels utilisées .....	49
V.3.3.3.	Mode opératoire.....	49
V.3.3.4.	Expression du résultat de l'humidité et le rendement d'extraction .....	49
V.4.	Maltage .....	50
V.4.1.	Calibrage et nettoyage .....	50
V.4.2.	Opération du trempage.....	50
V.4.3.	Opération de germination .....	51
V.4.4.	Opération de touraillage .....	51

V.5. Hydrolyses .....	52
V.5.1. Matériels utilisés .....	52
V.5.2. Dosage des glucoses par liqueur de Fehling.....	53
V.5.3. Calcul de rendement d'hydrolyse .....	55
V.5.4. Hydrolyse acide .....	56
V.5.5. Hydrolyse enzymatique par la méthode de maltage.....	56
V.5.5.1. Gélification.....	57
V.5.5.2. Hydrolyse enzymatique proprement dite .....	58
V.5.6. Essai d'hydrolyse enzymatique .....	58
V.5.6.1. Essai d'hydrolyse d'amidon du tubercule.....	58
V.5.6.2. Essai d'hydrolyse de la farine brute .....	61
V.5.6.3. Essai d'hydrolyse de la farine épuisée.....	62
V.6. Fermentation alcoolique.....	63
V.6.1. Principe .....	63
V.6.2. Description du fermenteur .....	63
V.6.3. Mode opératoire de la fermentation.....	64
V.6.4. Agent de fermentation .....	64
V.6.5. Compositions initiales du moût.....	64
V.7. Distillation.....	65
V.7.1. Matériels.....	65
V.7.2. Mode opératoire .....	65
V.7.3. Calcul de la densité, du degré et du rendement de fabrication d'alcool	66
Chapitre VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....	67
VI.1. L'extraction d'amidon.....	67
VI.2. Humidité .....	68
VI.3. Résultats de l'hydrolyses .....	70
VI.3.1. Résultats d'hydrolyse acide d'amidon .....	70

VI.3.2. Résultats de l'hydrolyse enzymatique .....	70
VI.3.2.1. Essai d'hydrolyse d'amidon .....	70
VI.3.2.2. Résultats d'hydrolyse de la farine brute .....	74
VI.3.2.3. Résultat d'hydrolyse de la farine épuisée .....	75
VI.4. Résultats de fermentation .....	76
VI.4.1. Evolution de la densité .....	76
VI.4.2. Evolution de température .....	78
VI.5. Résultats de la distillation .....	80
CONCLUSION .....	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	82
REFERENCES WEBOGRAPHIQUES .....	85
ANNEXE.....	a
Annexe N°1 .....	a
Annexe N°2 .....	b
TABLE DES MATIERES .....	c

**Auteur :** RANDRIANARIVELO Herilanto Ignace

**Email :** randrianariveoloignace@gmail.com

**Téléphone :** 0349923183

**Nombres de pages :** 85

**Nombres de tableaux :** 36

**Nombres de figures :** 43

**Titre :** « Optimisation de fabrication de l'éthanol à partir de la farine de manioc par voie d'hydrolyse enzymatique »



### **RESUME :**

Cet ouvrage concerne une autre approche concernant la fermentation des matières amylacées en vue de l'obtention d'un éthanol à partir de manioc. Nous avons fait le choix de travailler sur le manioc, car non seulement il renferme de l'amidon comme source de glucose pour produire de l'alcool par fermentation, mais aussi il est facile à cultiver et en abondance à MADAGASCAR. Pendant les études expérimentales, par adaptation des techniques de production d'éthanol à l'échelle laboratoire, des divers types des paramètres optimales sont été déterminés pour l'hydrolyse et pour la fermentation. Nous avons obtenu des produits après distillation, qui sont l'éthanol dont les degrés alcooliques sont 85°GL avec un rendement de 18,61%, 75°GL avec un rendement de 4,273% et de 4,894%.

**Mots-clés :** amidon, distillation, fermentation, hydrolyse, malt, manioc.

**Title:** « Optimization of ethanol production from cassava flour by enzymatic hydrolysis »

### **ABSTRACT:**

This work concerns another approach concerning the fermentation of starchy materials with a view to obtaining ethanol from cassava. We made the choice to work on cassava, because not only does it contain starch as a source of glucose to produce alcohol by fermentation, but it is also easy to cultivate and abundant in MADAGASCAR. During the experimental studies, by adapting the techniques of ethanol production to the laboratory scale, various types of optimal parameters were determined for the hydrolysis and the fermentation. We obtained products after distillation, which are ethanol whose alcoholic degrees are 85°GL with a yield of 18,61%, 75°GL with a yield of 4,273% and 4,894%.

**Keywords:** starch, distillation, fermentation, hydrolysis, malt, cassava.

**Rapporteur :** RAZAFIMANDEFITRA André