



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

MENTION : PHYSIQUE ET APPLICATIONS



MÉMOIRE

*Pour l'obtention du diplôme de*

**Master d'Ingénierie en Energies Renouvelables**

*Sur :*

**« PRODUCTION DE BIOETHANOL A PARTIR DE LA CANNE A SUCRE :  
REALISATION D'UN PROTOTYPE UTILISANT L'ENERGIE SOLAIRE  
THERMIQUE »**

*Présenté par*

RAKOTOMALALA Jean François

*Devant la commission d'examen composée de :*

<u>Président</u> :	- Monsieur RAKOTOMALALA Minoson	Professeur Titulaire - UA
<u>Examineur</u> :	- Madame RAKOTO JOSEPH Onimihamina	Maître de Conférences- UA
<u>Encadrants</u> :	- Monsieur RAMANANTSOA Ravo	Maître de Conférences - UA
	- Monsieur RANDRIANIRAINY Huchard	Maître de Conférences - CNRIT

Le 28 Mai 2016







**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES**  
**MENTION : PHYSIQUE ET APPLICATIONS**



**MÉMOIRE**

*Pour l'obtention du diplôme de*

**Master d'Ingénierie en Energies Renouvelables**

*Sur :*

**« PRODUCTION DE BIOETHANOL A PARTIR DE LA CANNE A SUCRE :  
REALISATION D'UN PROTOTYPE UTILISANT L'ENERGIE SOLAIRE  
THERMIQUE »**

*Présenté par*

RAKOTOMALALA Jean François



*Devant la commission d'examen composée de :*

<u>Président</u> :	- Monsieur RAKOTOMALALA Minoson	Professeur Titulaire - UA
<u>Examineur</u> :	- Madame RAKOTO JOSEPH Onimihamina	Maître de Conférences- UA
<u>Encadrants</u> :	- Monsieur RAMANANTSOA Ravo	Maître de Conférences - UA
	- Monsieur RANDRIANIRAINY Huchard	Maître de Conférences - CNRIT

Le 28 Mai 2016

## **REMERCIEMENTS**

---

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux personnes sans lesquelles cet ouvrage n'aurait pu être achevé, à savoir :

- Monsieur Marson RAHERIMANDIMBY, Professeur titulaire, Responsable du Domaine Sciences et Technologies de l'Université d'Antananarivo de m'avoir autorisé à soutenir mon mémoire de Masters d'Ingénierie en Energies Renouvelables (MIER).
- Monsieur Hery Tiana RAKOTONDRAMARANA, Maître de Conférences, Responsable de la mention Physique et Application de m'avoir accordé de m'inscrire dans son établissement.
- Monsieur RAKOTOMALALA Minoson Professeur Titulaire de me fait l'honneur, d'avoir accepté d'être le président du jury de ce travail.
- Madame RAKOTO JOSEPH Onimihamina, Maître de conférences, responsable de la formation MIER, pour ses conseils judicieux, ses orientations et ses remarques constructives durant mes années d'études.
- Monsieur RAMANANTSOA Ravo, Maître de Conférences, d'avoir accepté de prendre en charge mon encadrement et de m'avoir donné des conseils, des instructions pour le bon déroulement de mon stage.
- Monsieur RANDRIANIRAINY Huchard, Maître de Conférences, chef de département énergétique du CNRIT, d'avoir accepté ma candidature en tant que stagiaire au sein du centre et de m'avoir octroyé ses expériences enrichissantes et pleine d'intérêt au cours des réalisations.
- Tous les enseignants de la Formation Masters d'Ingénierie en Energies Renouvelable d'avoir consacré du temps pour nous transmettre leurs connaissances et leurs compétences au cours des cinq années de la formation.
- Tout le corps administratif pour leur contribution au bon fonctionnement de la formation.
- Ma mère, mes oncles et mes fratries, qui ont veillé à mes éducations avec infiniment d'amour.
- Mes collègues, amis proches qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de cet ouvrage.

## TABLE DES MATIERES

---

REMERCIEMENTS .....	i
TABLE DES MATIERES .....	ii
NOMENCLATURE .....	iv
LISTE DES ACRONYMES/ABREVIATIONS .....	v
LISTE DES FIGURES .....	vi
LISTE DES TABLEAUX .....	vii
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE I : CHAPITRE INTRODUCTIF : .....	2
L'ENERGIE A MADAGASCAR ET LE CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES INDUSTRIELLE ET TECHNOLOGIQUE (CNRIT) .....	2
A. L'ENERGIE A MADAGASCAR .....	2
1.1. Les problèmes énergétiques à Madagascar .....	2
1.2. La biomasse à Madagascar .....	2
1.3. Objectif de la mémoire .....	3
B. CNRIT .....	4
1.4. Présentation du CNRIT .....	4
1.4.1. Historique .....	4
1.4.2. Objectifs .....	4
1.4.3. Missions de CNRIT .....	4
1.4.4. Structure d'Appui .....	5
1.5. Présentation de l'organisation du lieu de stage .....	5
CHAPITRE II : PRODUCTION DE BIOETHANOL .....	6
2.1. Ethanol .....	6
2.1.1. Propriétés .....	6
2.1.2. Avantages et inconvénients .....	6
2.2. Caractéristiques et production de la matière première, canne à sucre .....	8
2.2.1. Composition chimique .....	8
2.2.2. Cycle cultural et rendement: .....	8
2.3. Principe de production de bioéthanol .....	8
2.3.1. Pressage .....	9
2.3.2. Fermentation alcoolique .....	9

2.3.3. Distillation.....	11
CHAPITRE III : MISE EN PLACE D’UN PROTOTYPE.....	13
3.1. Schéma synoptique du système intégral.....	13
3.2. Fonctionnement du système de production .....	14
3.3. Fermenteur.....	14
3.4. Distillateur .....	15
3.5. Panneau solaire thermique.....	15
3.6. Ballon de stockage.....	16
3.7. Système de pilotage électronique .....	16
CHAPITRE IV : .....	23
RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS .....	23
4.1. Etudes sur le processus de fermentation.....	23
4.1.1. Influence de la nature de la levure utilisée .....	23
4.1.2. Influence de la quantité de levure .....	23
4.1.3. Effet de la fermeture du fermenteur au premier jour : .....	23
4.1.4. Effet d’agitation.....	24
4.1.5. Influence de la quantité de jus fermenté.....	24
4.1.6. Influence de la nature de jus fermenté .....	24
4.2. Distillations.....	25
4.3. Evolution de la température dans les différentes parties du système .....	28
4.4. Utilisation du mélange Essence-Ethanol .....	29
4.5. Coût des matériels utilisés .....	30
CONCLUSION GENERALE .....	31
REFERENCES .....	32

## NOMENCLATURE

---

Symboles	Signification	Unité
°GL	Taux d'alcool (Gay Lussac)	°GL
Pu	Puissance utile	W
S	Surface	m <sup>2</sup>
T	Température	°C
Ta	Température ambiante	°C

## **LISTE DES ACRONYMES/ABREVIATIONS**

---

ADER	Agence de Développement de l'Electrification Rurale
AIDER	Association des Ingenieurs pour le Developpement des Energies Renouvelables
ATP	Adénosine Triphosphate
CIDST	Centre de l'Information et de Documentation Scientifique et Technique
CMCS	Centre Malgache de la Canne et du sucre
CNRIT	Centre Nationale de Recherches Industrielle et Technologique
ETBE	Ethyle Tertio Butyle Esther
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
IME	Institut pour la Maîtrise de l'Energie
IST	Institut Supérieur de Technologie
MIER	Master d'Ingénierie en Energies Renouvelables
ONG	Organisation Non Gouvernementale
UA	Université d'Antananarivo
WWF	World Wildlife Fund



## LISTE DES FIGURES

---

Figure 2.3. Schéma de principe simplifié de transformation de canne à sucre en éthanol....	8
Figure 3.1.a. Schéma synoptique de l'expérimentation .....	13
Figure 3.1.b. Vue de l'installation intégrale du système .....	13
Figure 3.6. Les matériels utilisés pour la concrétisation du dispositif .....	16
Figure 3.7.a. Vue de face du dispositif de pilotage électronique .....	17
Figure 3.7.b. Organigramme de fonctionnement du dispositif électronique .....	20
Figure 3.7.c. Schéma de simulation du système de pilotage .....	22
Figure 4.3. Evolution de la température de chaque sous système .....	28
Figure 4.4. Groupe utilisée pour le test .....	29

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 2.1.1 Comparaisons des caractéristiques de essence et de l'éthanol: .....	6
Tableau 4.1.6. Evolution de la température au cours de la fermentation .....	25
Tableau 4.2. Résultat de la distillation 2 .....	26
Tableau 4.4 : Evolution de la consommation avec différentes proportions d'éthanol essence .....	29
Tableau 4.5. Listes et prix des matériels nécessaires .....	30

# INTRODUCTION GENERALE

---

L'énergie désigne le potentiel qu'a un corps ou un système et qu'il est susceptible de transformer en travail, en mouvement, en chaleur, en onde électromagnétique ou en autre forme concrète pouvant servir à nos besoins. L'énergie existe alors sous différentes formes : thermique, lumineux, mécanique, électrique, chimique, nucléaire et gravitationnelle. Les différentes sources d'énergie peuvent être classées en deux catégories : celles qu'on appelle non renouvelables ou fossiles et celles qu'on qualifie de renouvelables. Ces dernières comprennent l'énergie solaire, éolienne, géothermique, hydroélectrique et celle issue de la biomasse. Ces sources d'énergies peuvent être transformées en sources d'énergies secondaires telles que l'électricité. Cette dernière est largement utilisée aussi bien dans les activités industrielles que dans la vie quotidienne.

A Madagascar, on a quasiment toutes les ressources d'énergies renouvelables mais leur exploitation reste actuellement limitée à un très faible taux, notamment pour le cas de transformation la biomasse. La canne à sucre est l'une des sources en biomasse qu'on peut trouver partout à Madagascar, ceci grâce au climat favorable à sa culture. Elle est une source potentielle en biocarburant. Le produit obtenu peut être utilisé comme additif ou comme substitut afin d'alimenter des groupes électrogènes et fournir de l'électricité. Par la suite, la distillation du moût pour produire le bioéthanol consomme de combustible qui est nocif à l'environnement.

Ce mémoire de fin d'étude va dans cette perspective et s'intitule : « PRODUCTION DE BIOETHANOL A PARTIR DE LA CANNE A SUCRE : REALISATION D'UN PROTOTYPE UTILISANT L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE ». Plus explicitement, ce travail consiste à l'étude et à la réalisation d'un démonstrateur d'un système de production de bioéthanol en utilisant l'énergie solaire comme source de chaleur pour les procédés de distillation.

Ce manuscrit se divise en quatre grands chapitres. Tout d'abord, on va voir brièvement en premier chapitre l'état des lieux actuel et les problèmes énergétiques à Madagascar. Nous verrons également une description synthétique du CNRIT (Centre National de Recherches Industrielle et Technologique) qui est le centre d'accueil où nous avons réalisé notre stage. Ensuite, le deuxième chapitre décrit les éléments bibliographiques nécessaires et tout ce qu'il faut savoir sur la production de bioéthanol. Le troisième chapitre concerne la mise en place d'un prototype qui détaille les dispositifs expérimentaux incluant les matériels et méthodes utilisées. Nous terminerons avec les résultats que nous avons obtenus avant de conclure ce rapport.

# **CHAPITRE I : CHAPITRE INTRODUCTIF :**

## **L'ENERGIE A MADAGASCAR ET LE CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES INDUSTRIELLE ET TECHNOLOGIQUE (CNRIT)**

---

### **A. L'ENERGIE A MADAGASCAR**

---

#### **1.1. Les problèmes énergétiques à Madagascar**

Selon le diagnostic du secteur énergie à Madagascar réalisé par le WWF avec la collaboration du Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures, à Madagascar, le bois énergie tient la première position des combustibles qui est 92% de la consommation énergétique grâce à sa disponibilité partout et son coût accessible par tout le monde.

En deuxième rang, les produits pétroliers qui gagne 7% de l'offre énergétique. La part des énergies renouvelables reste encore marginale, elle occupe le 1% de l'offre. Dans ce petit pourcentage, l'énergie hydroélectrique constitue la source d'énergie renouvelable la plus exploitée, soit 54% de l'énergie électrique actuelle.

Les différentes sources d'énergie à Madagascar possèdent une interdépendance mais nous pouvons dire qu'il n'y a pas de vision globale sur ce secteur. C'est mieux donc si on va mettre en cohérence les actions des différents sous-secteurs énergétiques. Les recherches sur l'agrocarburant sont isolées et encore peu exploitées.

L'accès à l'électricité reste faible à cause de son prix hors de portée de la majorité de la population et des différentes contraintes de production, mais également à cause de l'éloignement ou isolement des petits villages par rapport aux zones desservis par les réseaux de distribution. Toujours est-il que d'après les calculs, le besoin en 2030 sera de 3,6 fois la quantité d'électricité consommée aujourd'hui.

#### **1.2. La biomasse à Madagascar**

Le secteur agrocarburant se trouve encore au stade expérimental. Aucune vision globale du secteur agrocarburant n'a été entreprise. D'après les études faites, 349 parties prenantes ont été interrogées dans 20 régions pour établir cet état des lieux. Trois sous-secteurs ont été abordés : l'agrodiesel, l'agroéthanol et le biogaz. Le résultat général a montré qu'excepté le biogaz, les deux premiers sous-secteurs sont à leur stade de lancement.

Au secteur bioéthanol, pour les paysans, la transformation de la canne à sucre est essentiellement destinée à la fabrication de l'alcool de bouche. La production annuelle

d'alcool est estimée à 980 000 hl à 2 450 000 hl avec des alcools de 40 à 70°GL. Cependant, cette production peut être destinée à la production d'électricité et à des fins domestiques soit avec des rectificateurs du taux d'alcool, soit avec des foyers à éthanol.

Les impacts du secteur agro carburant à Madagascar ne sont pas encore très significatifs mais le secteur présente des enjeux importants.

Le secteur Agrocaburant a connu un développement rapide à Madagascar depuis 2005 avec l'arrivée massive d'investisseurs étrangers. Cette situation s'est coïncidée avec les initiatives entreprises par le Gouvernement malgache de promouvoir les investissements directs étrangers afin d'accélérer le développement économique de Madagascar. Par ailleurs, le contexte international a grandement contribué à l'augmentation de l'intérêt sur la filière à Madagascar. En premier lieu, la hausse du prix du pétrole qui a contribué à booster la recherche et la production de source d'énergie alternative. Ensuite, le souci environnemental, les tendances pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, le marché du carbone dans lequel les agrocaburants ont été perçus comme une solution intéressante

Presque 99% de la production de canne sont destinées à la fabrication d'alcool de bouche. La production d'éthanol à des fins agrocaburants est très marginale et n'a pas encore atteint le stade de production commerciale.

### 1.3. Objectif de la mémoire

En vue du contexte cité ci-dessus, l'objectif principal de cette mémoire de fin d'études est donc de produire du biocaburant à base de canne à sucre en utilisant une source d'énergie propre à la place du bois de chauffe ou autres combustibles polluants. En plus, de renforcer la valorisation de la canne à sucre, sa transformation en carburant contribue à réduire son consommation en alcool de bouche (souvent non conforme aux normes) et sa nuisance à la santé publique.

Un intérêt particulier du système que nous allons exposer est qu'on peut découvrir localement tous les matériels et outils nécessaires à sa réalisation, ce qui permet sa duplication par les petites collectivités rurales.

Avant de voir les détails sur les travaux effectués, nous allons voir dans le paragraphe suivant une brève description du CNRIT, lieu où s'est déroulé l'ensemble de mon stage.

## **B. CNRIT**

---

### **1.4. Présentation du CNRIT [1]**

#### **1.4.1. Historique**

Le C.N.R.I.T est un établissement public à caractère scientifique, technique et économique. Il a été créé suivant le décret n° 87 – 288 du 28 juillet 1987. Il a son siège au 38, rue Rasamimanana, Fiadanana Tsimbazaza 101 Antanarivo.

#### **1.4.2. Objectifs**

Le CNRIT a pour objet de:

- contribuer à l'innovation ;
- participer à l'élaboration et la conduite de la politique nationale de recherches pour le développement industriel et technologique ;
- contribuer à la valorisation des résultats de recherches au transfert et à l'innovation ;
- contribuer à la formation scientifique et technologique ;
- contribuer à la diffusion des informations scientifiques et technologiques en coopération avec le Centre d'Information et de Documentation Scientifique et Technique (C.I.D.S.T.);

#### **1.4.3. Missions de CNRIT**

En général le CNRIT a deux missions :

- a) Participer à l'élaboration et à la mise en œuvre de la politique nationale de recherches technologiques:
  - recherche et l'innovation ;
  - valorisation des matières premières et des ressources locales ;
  - développement des technologies endogènes ;
  - absorption et adaptation des technologies étrangères ;
- b) Valoriser et appliquer les résultats de recherches pour un développement durable (économique, social, environnemental) :
  - encadrer, assister et appuyer les opérateurs de développement ;
  - renforcer les capacités régionales par la maîtrise des technologies propres ;
  - gérer et protéger l'environnement (industriel, physique et social....) ;

#### 1.4.4. Structure d'Appui

Les taches de la structure d'appui sont étalées sur deux niveaux :

- au niveau des opérateurs, il offre un appui et assistance (conseil, étude, analyse), fait des encadrements (information, formation, évaluation) et assure le transfert de nouvelles technologies ;
- au niveau des chercheurs, il propose des services, des encadrements des étudiants pour mémoire de fin de cycle ;

#### 1.5. Présentation de l'organisation du lieu de stage

- Conseil d'Administration

Le conseil d'Administration est chargé de présenter les programmes de recherches technologiques, les conventions en matière de recherche scientifique et technique auprès de l'instance hiérarchique supérieure.

C'est à lui qu'incombent les tâches relatives aux états financiers du centre et la décision de la mise en œuvre des projets.

- Direction

La Direction a pour taches d'appliquer les décisions et programmes validés par le conseil d'Administration. Elle a pour rôle de coordonner les différents départements techniques et structure d'Appui.

- Département énergétique

Nous avons été intégré dans le département énergétique afin d'accomplir notre stage.

La maîtrise des énergies nouvelles et renouvelables et surtout les usages de l'énergie, la formation, encadrement en énergies nouvelle et renouvelable, l'assistance et la maintenance en matière d'énergies renouvelable sont à la charge de ce département.

Pour résumer ce chapitre, le problème d'électrification rurale à Madagascar est loin d'être résolu et à cela s'ajoute la contrainte mondiale de développer et de basculer vers l'utilisation des énergies renouvelables. Le stage que j'ai effectué rentre dans ce cadre et se trouve en cohérence avec les perspectives de l'état et de la politique sectorielle de l'énergie adoptée par l'état malagasy. Ayant situé le contexte de mon stage de mémoire, nous allons poursuivre avec le chapitre décrivant le principe et les étapes de la production de bioéthanol et la réalisation de notre démonstrateur.

## CHAPITRE II : PRODUCTION DE BIOETHANOL

---

### 2.1. Ethanol

#### 2.1.1. Propriétés

Tableau 2.1.1 Comparaisons des caractéristiques de essence et de l'éthanol:

Carburant	Essence normale	Essence super	Ethanol
Densité	0,72-0,77	0,72-0,77	0,79
Composants %	86C 14H	86C 14H	52C 13H 35O
Pouvoir calorifique MJ/kg	42,7	43,5	26,8
Rapport air/carburant kg/kg	14,8	14,7	9,0

Le pouvoir calorifique de l'éthanol pur est réduit de 40% par rapport à l'essence, ainsi que le rapport air-carburant. Donc pour une même puissance donnée ; il faut plus de volume d'éthanol à utiliser. Dans la pratique, avec l'E85, on utilise un facteur de 1,4 à 1,5 sur la consommation. Cependant, le rendement du moteur peut être amélioré en augmentant le rapport volumétrique. L'éthanol produit moins de chaleur lors de la combustion, la température dans la chambre de combustion s'en trouve abaissée, pour autant que la richesse ait été adaptée. Dans le cas contraire, l'appauvrissement du mélange détonant aura pour effet d'augmenter la température. [2]

#### 2.1.2. Avantages et inconvénients

Les avantages de l'éthanol par rapport à l'essence sont diverses : baisse d'émissions de CO, CO<sub>2</sub>, et d'hydrocarbure imbrûlés sous forme HC, en plus, la réduction globale des gaz à effet de serre. L'utilisation d'E10 (10% d'éthanol dans l'essence) réduit les émissions de CO à 25%. L'éthanol est en outre absolument exempt de soufre [2]. La production est durable due à l'utilisation de matières premières locales. Son utilisation réduit la dépendance à l'égard des produits pétroliers importés.

L'utilisation de l'éthanol diminue les émissions des particules, notamment des particules fines qui menacent la santé des enfants, des personnes âgées et des personnes atteintes de troubles respiratoires. Il peut remplacer le benzène qui est un produit toxique cancérigène. Il est un produit non toxique et rapidement biodégradable. [3]

Son indice d'octane rend efficace le moteur à allumage par étincelle et le taux de benzène diminue en fonction de l'augmentation de la quantité de l'éthanol dans l'essence.



On a été démontré que les véhicules à un seul carburant et les véhicules tous carburant, à moteur à démarrage par étincelle alimentés en bioéthanol, présentait un rendement énergétique plus élevé que le moteur à essence [3].

On peut avoir un haut rendement à un coût relativement réduit avec le bioéthanol à indice d'octane élevé.

En face des ceux différents avantages, il y a quelques inconvénients :

- son indice de cétane étant moins élevé ;
- il requiert un réglage de la pression de vapeur de l'essence à cause des émissions élevées d'hydrocarbures par évaporation (15% pour l'E10) ;
- la pression de vapeur étant basse et la chaleur latente d'évaporation de l'éthanol est élevée, la difficulté de démarrage à froid se présente dans les régions plus froid ;
- il peut être corrosif pour le moteur à cause de sa capacité lubrifiante assez élevée ;
- présence de problèmes de stabilité de phase dans le mélange d'essence en cas de présence d'eau ;

a. L'éthanol et l'ETBE

L'utilisation de l'ETBE pour l'introduction de l'éthanol dans l'essence est montrée par deux raisonnements techniques :

- le respect de la norme de volatilité des carburants. L'introduction directe d'éthanol conduit à l'augmentation de la pression de vapeur, mesurée par un indice de volatilité, qui provoquera des problèmes de démarrage à chaud et de taux d'évaporation plus important. A noter que l'E5 augmente de 7 kPa la pression de vapeur. L'ETBE diminue la pression de vapeur ;
- la coexistence de l'eau et l'éthanol qui pourrait conduire à la démixtion c'est-à-dire à la séparation : en présence de faible quantité d'eau du mélange essence éthanol. La conséquence de démixtion est la migration de l'éthanol vers l'eau, dont on ne peut exclure la présence en faible quantité dans le fond de réservoir.

Nous allons voir en détail dans les paragraphes suivant les étapes de la production d'alcool.

## 2.2. Caractéristiques et production de la matière première, canne à sucre

### 2.2.1. Composition chimique

Tableau 2.2.1. Composition chimique en pourcentage massique de canne à sucre [8]

Eau	Sucre	Ligneux	Silice	Azote	Potasse	Magnésium	Chaux	Acide phosphorique	Trace
75	15	9,445	0,264	0,09	0,085	0,043	0,041	0,031	0,001

### 2.2.2. Cycle cultural et rendement: [8]

Typiquement, la canne présente une période de maturation en saison sèche, où le taux de sucre augmente fortement et où de nombreuses feuilles sèchent. La floraison débute ensuite, suivie de la production des graines. Ces deux éléments entraînent une baisse du taux de sucre.

Il y a deux cycles, à savoir :

- le cycle long, de la plantation à la plantation (jusqu'à son élimination) : 6 à 8 ans
- le cycle court, coupe en coupe : 8 à 10 mois.

Le rendement à Madagascar est de 80 t/ha de canne vierge de première repousse. À partir de la troisième repousse il diminue entre 40 et 60 t/ha. Le rendement moyen national de production atteint le 70 t/ha et celui d'Ambilobe est de 100 t/ha actuellement.

- Le rendement en sucre est en moyenne environ 10 % de la masse totale de la canne. Tandis que celui de la bagasse représente le 30 % de la masse totale de la canne.

1 t de bagasse (composé de ligneux (fibre) 45 à 50 %, humidité (eau) 46 à 51 %, sucre 1 à 2 %) produit 330 kg de vapeur haute pression et 130 kWh d'électricité.

Rendement en mélasse (0,794 kg/L): 4% de la masse totale de la canne à sucre

Rendement en éthanol : 1 t de canne produit 49,2 L d'éthanol et 1 t de mélasse produit 220L d'éthanol

## 2.3. Principe de production de bioéthanol

La figure 2.3 suivante montre le schéma de principe simplifié de la production d'éthanol à partir de la canne à sucre.



Figure 2.3. Schéma de principe simplifié de transformation de canne à sucre en éthanol

Les paragraphes suivants expliquent point par point ces trois processus.

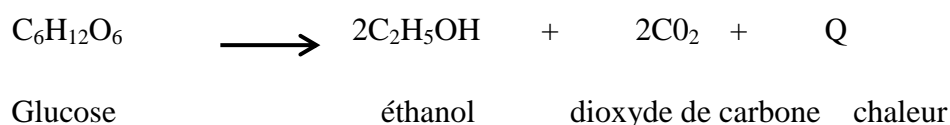
### 2.3.1. Pressage

La première étape du processus de production consiste à extraire le jus de la canne à sucre. Le produit obtenu est donc la mélasse et la bagasse.

### 2.3.2. Fermentation alcoolique

#### a. Définition [5]

La fermentation alcoolique est la conversion du sucre en éthanol et en anhydride carbonique par l'action des levures en milieu anaérobie, selon le bilan chimique suivant :



Le rendement stœchiométrique maximal est de 0,51%. Théoriquement, 10 kg de sucre donne 5,1 kg (6,5 L) d'éthanol et 4,9 kg d'anhydride carbonique. Il y a une libération d'énergie, environ 27 kcal/mol de glucose.

#### b. Levure

Les levures sont des champignons microscopiques unicellulaires (ronds ou ovales) non pathogènes. L'une des plus importantes utilisées pour produire l'éthanol fait partie du genre *Saccharomyces cerevisiae* qui est une levure de boulangerie. Elle donne une fermentation uniforme, rapide, et des rendements élevés en éthanol. Elle est très tolérante aux écarts de température (26-34°C), aux variations de pH, et aux concentrations élevées en éthanol. Elles sont des organismes à respiration facultative. Dans un cycle normal de fermentation, elles emploient l'oxygène au début et continuent alors à se multiplier. C'est seulement pendant la période anaérobie qu'elles produisent l'éthanol.

#### c. Déroulement

Pour accomplir la formation d'éthanol lors de la fermentation après l'ajout de levure, il y a trois phases différentes :

Un premier temps d'attente, où rien ne semble se produire, mais la levure s'adapte à son nouvel environnement, et commence à se développer en taille ;

Après environ 30 minutes, la levure commence à se reproduire rapidement et le nombre de cellules de levure augmente, elle double toutes les 3 h. De l'anhydride carbonique est libéré en grande quantité, elle bouillonne à travers le moût. Pendant que la fermentation a lieu, les cellules de levure ont tendance à se regrouper ensemble ;

La dernière phase est une phase stationnaire où les aliments deviennent rares, et le taux de croissance ralentit. La production d'anhydride carbonique ralentit, et la levure sédimente au fond du fermenteur.

#### d. Facteurs d'inhibition

Manque d'azote :

Le facteur le plus courant de limitation de la croissance des levures est l'insuffisance d'azote. La façon la plus courante au niveau industrielle, de l'ajouter est sous forme d'ion d'ammonium, sous forme de sels comme les sulfates et les phosphates

Manque d'oxygène,

C'est le deuxième facteur limiteur courant, mais nous avons seulement besoin de lui jusqu'à ce qu'un nombre élevé de cellules soient présents (par exemple pendant le premier jour).

Le CO<sub>2</sub> est à la fois activateur et inhibiteur du métabolisme lévurien [3].

Le rendement de conversion augmente de 25% lors d'une croissance en aérobie sur glucose sous une pression partielle de 0,2 bar. Cependant une augmentation de la pression de CO<sub>2</sub> entraîne une chute de la viabilité cellulaire.

Le taux de croissance de *Saccharomyce cerevisiae* s'inhibe complètement à 2,7 bar de pression.

#### Effet de température

La température intervient sur la vitesse de croissance de la levure et sur la production d'éthanol. Après avoir effectué plusieurs cultures de levure avec une température 27°C à 39°C, Aldiguier et al (2004) ont trouvé que le taux de croissance maximal a été obtenu à 30°C, alors que la finesse maximale sur la production d'éthanol a été à 33°C. Une température supérieure à 30°C augmente la vitesse de production d'éthanol mais accroît la sensibilité des levures à l'éthanol et diminue sa viabilité.

#### Homogénéité du milieu dans le cuve de fermentation

L'homogénéité du moût favorise les échanges entre les levures et le milieu. Dans la cuve œnologique, le mélange est assuré par le dégagement de CO<sub>2</sub>. En pratique, on considère que, le milieu est homogène dans la fermentation en phase liquide. Malherbe (2003) a mesuré les principaux paramètres à différents endroits d'une cuve de 110 hl lors d'une fermentation en phase liquide, à 20°C. Elle a observé que la température ainsi que les concentrations en sucres et éthanol étaient parfaitement identiques aux différents points de mesure, quel que

soit le stade de la fermentation. Mais la levure diminue de 30% à la fin de la fermentation, suite à une sédimentation. La sédimentation de levure ne commence que lorsque la vitesse de production de  $\text{CO}_2$  devient inférieure à 0,15 g/L.h (soit environ 0,3 g/L.h de consommation de sucres), ce qui représente une vitesse très faible.

#### Effet de la taille de la cuve

Les cuves peuvent être de taille très différente. Malherbe (2003) a comparé les courbes de fermentation obtenues, en conditions rigoureusement identiques de fermentation en phase liquide, dans des cuves de 1 hl (taille pilote) et 110 hl. De son côté, Bely (1990a) a comparé l'échelle pilote avec l'échelle laboratoire. Dans les deux cas, les courbes d'évolution de la vitesse de fermentation, qui sont plus discriminantes que les courbes d'évolution de la densité, étaient superposables, ce qui montre que, premièrement, dans la gamme de taille utilisée dans la pratique, il n'y a certainement pas d'effet échelle, deuxièmement, il est tout à fait possible de reproduire à petite échelle les cinétiques fermentaires observées à la taille industrielle.

#### Effet d'ajout d'azote sur la cinétique fermentaire

Dans le cas de milieu moins de 150 mg/L d'azote assimilable, l'addition de sels d'ammonium (phosphate diammonique (DAP) ou sulfate diammonique) accélère de façon spectaculaire la vitesse de fermentation (Bely et al. 1990b).

### 2.3.3. Distillation

#### a. Définition et processus

La distillation est une technique qui consiste à porter un mélange liquide à l'ébullition pour en vaporiser les éléments les plus volatils que l'on condense ensuite avant de le récupérer sous forme liquide. Le procédé utilise donc la différence de volatilité. La température d'ébullition de l'éthanol est 78.3°C et celle de l'eau est 100°C.

#### b. Alambic

L'alambic classique est composé habituellement de quatre parties :

- le corps ou chaudière dans laquelle se trouve le liquide à distiller ;
- le chapiteau recouvre la chaudière et est muni d'un tube conique dans lequel les vapeurs vont s'élever ;
- le col de cygne, qui est un tube primitivement conique et en arc de cercle puis cylindrique et rectiligne, qui amène les vapeurs dans le condenseur ;

- le condenseur est formé par un serpentin, il est un tube en hélice à axe vertical sur les parois duquel les vapeurs se condensent par l'effet du refroidissement dû au liquide (eau) circulant autour ;

Au niveau industriel, l'éthanol obtenu subit encore une rectification de déshydratation par réfrigération ou par rectification à colonne. Avec ce procédé on obtient de l'éthanol à 96°GL. Pour augmenter encore la pureté de l'alcool, on utilise le procédé de déshydratation qui donne une production jusqu'à 99°GL.

Pour notre cas nous avons adopté la méthode la plus simple, en maîtrisant le point d'ébullition de l'éthanol. Parce que, notre objectif est d'avoir au moins 90°GL. Les autres nécessitent des technologies avec un coût assez élevé.

## CHAPITRE III : MISE EN PLACE D'UN PROTOTYPE

### 3.1. Schéma synoptique du système intégral

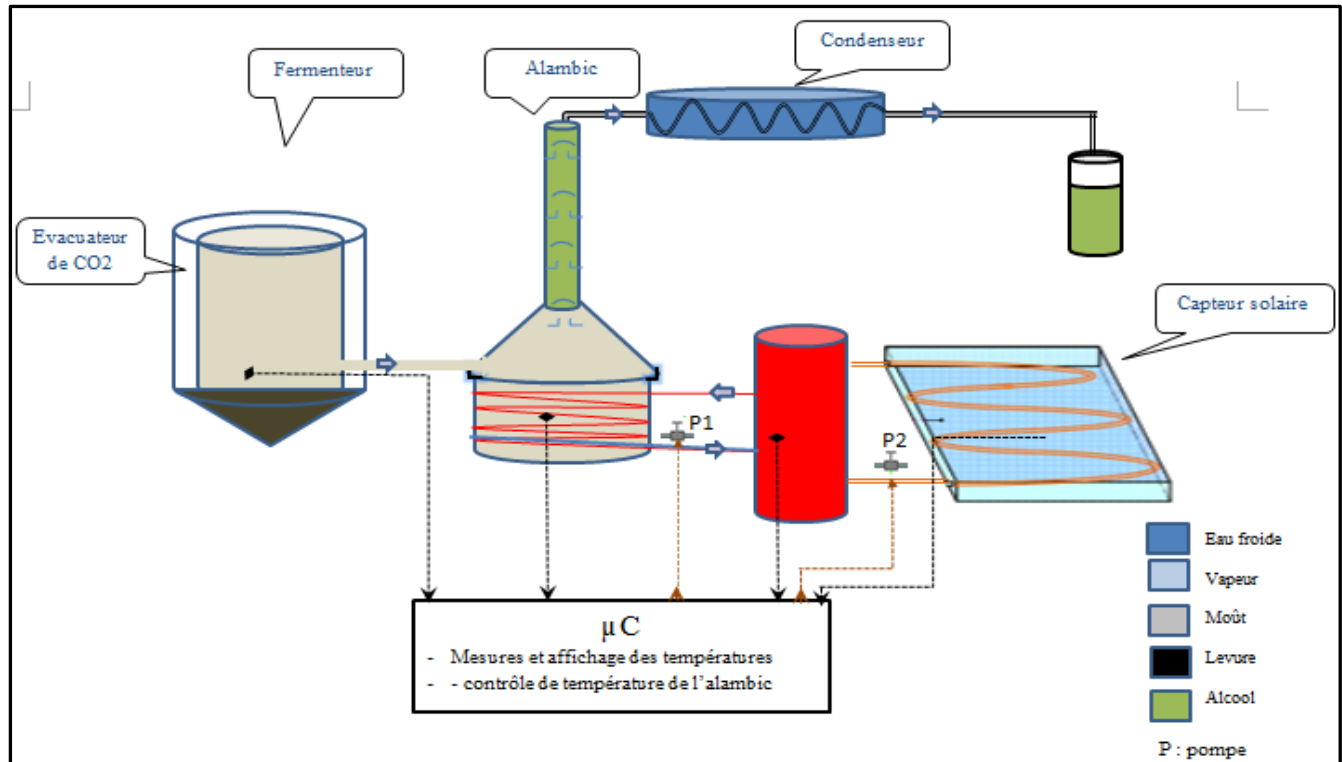


Figure 3.1.a. Schéma synoptique de l'expérimentation

La Figure 3.1.b. suivante montre l'installation réelle du système de distillateur. Nous l'avons utilisé à partir de la distillation.4.a.



Figure 3.1.b. Vue de l'installation intégrale du système

### 3.2. Fonctionnement du système de production

- On verse dans le distillateur le vesou fermenté avec la quantité de levure correspondante. Au cours de la progression de la fermentation, le CO<sub>2</sub> s'évacue automatique à travers l'eau (en bain marie) qui est aussi le joint hydraulique.
- Quand la fermentation est terminée, on transmet le moût vers l'alambic.
- Le distillateur est équipé d'un serpentin où circule l'eau chaude pour le chauffage
- L'énergie pour chauffer l'eau est donnée par le capteur solaire thermique.
- La circulation d'eau entre le capteur solaire et la chaudière et entre cette dernière et l'alambic est assurée par deux pompes électriques DC12V. Ces deux moteurs sont commandés par le système électronique. Si la température de l'alambic est inférieure à une température de consigne (température d'ébullition de l'éthanol) et la température de la chaudière est supérieure à cette température la pompe P1 fonctionne. Si l'une des deux conditions n'est pas satisfaite elle s'arrête. Pour l'isolation de la chaudière, dans le cas où la température du capteur solaire est inférieure à celle de la chaudière la pompe P2 s'arrête.
- Lorsque le point d'ébullition de l'éthanol est atteint l'alcool se vaporise. On condense la vapeur d'éthanol grâce au condenseur et on recueille l'éthanol à la fin.

### 3.3. Fermenteur

Pour le pressage de canne, nous avons utilisé la presse de canne chez le vendeur de jus de canne à sucre.

La fermentation est réalisée dans le milieu anaérobie. Dans le premier temps, afin de déterminer les paramètres favorables à la fermentation, nous avons utilisé des bouteilles plastiques qui facilitent la manipulation des petits échantillons. Nous avons ouvert manuellement ces bouteilles pour évacuer le CO<sub>2</sub>.

Puis, dans le second temps, à partir de la fermentation 3 nous avons employé un fut métallique 25 L intégré dans un bidon plastique 35 L. Le fut est équipé d'un petit moteur DC 12V pour le brassage et une sonde thermique LM35. L'entrefer entre les deux cuves est rempli d'eau qui sert comme joint hydraulique. Ce système facilite la manipulation du dispositif et favorise l'évacuation du gaz produit lors de la fermentation. Donc le CO<sub>2</sub> s'évacue automatiquement.

Le volume actif du fermenteur est le 80% de son volume total. Donc pour produire 1 L d'éthanol on doit verser 13 L de moût (15% en sucre avec un rendement de conversion 50%) dans une cuve fermentative de 16 L.



### 3.4. Distillateur

L'alambic est en inox 304, qui résiste à la corrosivité de l'alcool. Son volume est de 13 L. A son intérieur est inclus un serpentin en cuivre 3,5 m de longueur et 12 mm de diamètre. A son tête est munie d'un joint hydraulique qui facilite sa manipulation. L'alambic est donc démontable à son corps.

Le moyen de fixation de chaque pièce de l'alambic est fait par soudure autogène en utilisant la brasure. L'échange thermique entre le vapeur d'éthanol et l'eau froide se fait par contre-courant.

La méthode de séparation de l'alcool avec les autres compositions contenues dans le moût est une simple distillation.

Pour déterminer le taux d'alcool nous avons utilisé l'alcoomètre. Cet appareil de mesure joue sur la densité du liquide dans lequel il plonge.

Nous avons utilisé le condenseur du centre qui est un condenseur à plaque. L'eau froide circule à l'extérieur de la plaque où passe la vapeur d'éthanol.

### 3.5. Panneau solaire thermique

Pour avoir la chaleur de chauffage de l'alambic nous avons utilisé un capteur solaire thermique plan. Son dimension est  $0,7 \times 0,8 \text{ m}^2$ . Il est muni d'un vitre ordinaire, d'un tôle galvanisé coloré en noir en dessus du quel se place un serpentin en tuyau de cuivre 4,5 m de longueur 0,6 cm de diamètre. L'eau circule dans le serpentin pour avoir l'énergie emmagasinée par le corps noir. Entre le dos externe en contreplaqué et le tôle se trouve des couches de laine de verre qui assure l'isolation du système avec le milieu extérieur. L'énergie solaire est transformée en énergie thermique grâce à la plaque noir absorbante, par effet de serre. Le mouvement d'eau est par circulation forcée grâce à une petite pompe à eau DC 12V/6W. Le tuyau qui communique le capteur avec le ballon de stockage et entre ce dernier et l'alambic est enveloppé par une gaine amaflex pour éviter la perte d'énergie au cours de la circulation.

Le calcul adopté pour avoir la surface du capteur est:

$$P_u = S (B I - K (T_{fm} - T_a)) ; [7]$$

$$S = P_u / (B I - K (T_{fm} - T_a)) ;$$

avec :

$P_u$  : puissance utile ( $\text{W/m}^2$ ) ;

$I$  : flux de rayonnement disponible sur le plan des capteurs:  $3000 \text{ W/m}^2$  ;

$T_a$  : température ambiante:  $25^\circ\text{C}$ ;

$T_{fm}$  : température moyenne du fluide dans les capteurs:  $85^\circ\text{C}$ ;

S : surface des capteurs ( $m^2$ )

B: coefficient caractéristique des gains du capteur, 0,7 à 0,8

K: coefficient caractéristique des pertes du capteur : 4 à 10  $W/m^2/^{\circ}C$

### 3.6. Ballon de stockage

Le ballon de stockage assure la réserve en eau chaude qui ravitaille l'énergie de chauffage de l'alambic. Il est formé par trois couches. La plus interne est un fut de 30 L qui est donc le volume du système. L'intermédiaire est l'isolant constitué par la laine de verre d'épaisseur 5cm. La plus externe est en tôle galvanisée qui assure la couverture de l'isolant. Il possède deux entrées et deux sorties d'eau qui servent la circulation d'eau entre le capteur et chaudière et entre ce dernier et l'alambic.



Figure 3.6. Les matériels utilisés pour la concrétisation du dispositif

avec :

A : alambic et ses accessoires

B : cuve de fermentation

C : le capteur solaire et chaudière, tube isolant

D : laine de verre

E : ballon de stockage enveloppé en laine de verre

### 3.7. Système de pilotage électronique

La vue de face suivante montre les trois boutons de commandes et les quatre entrées analogiques à partir de la sonde thermique.

- « M » : menu à afficher ;
- « + » : incrémentation de la température de consigne ;
- « - » : décrémentation de la valeur consigne.

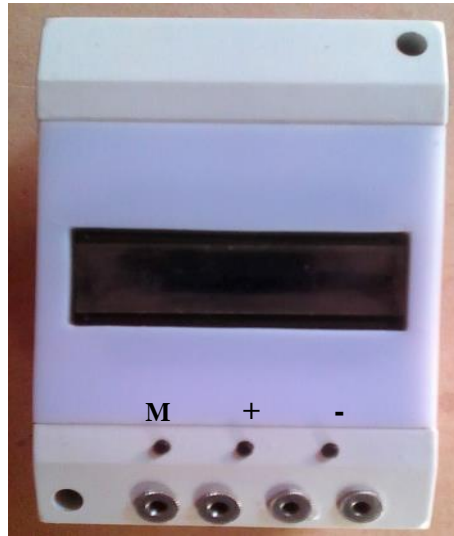
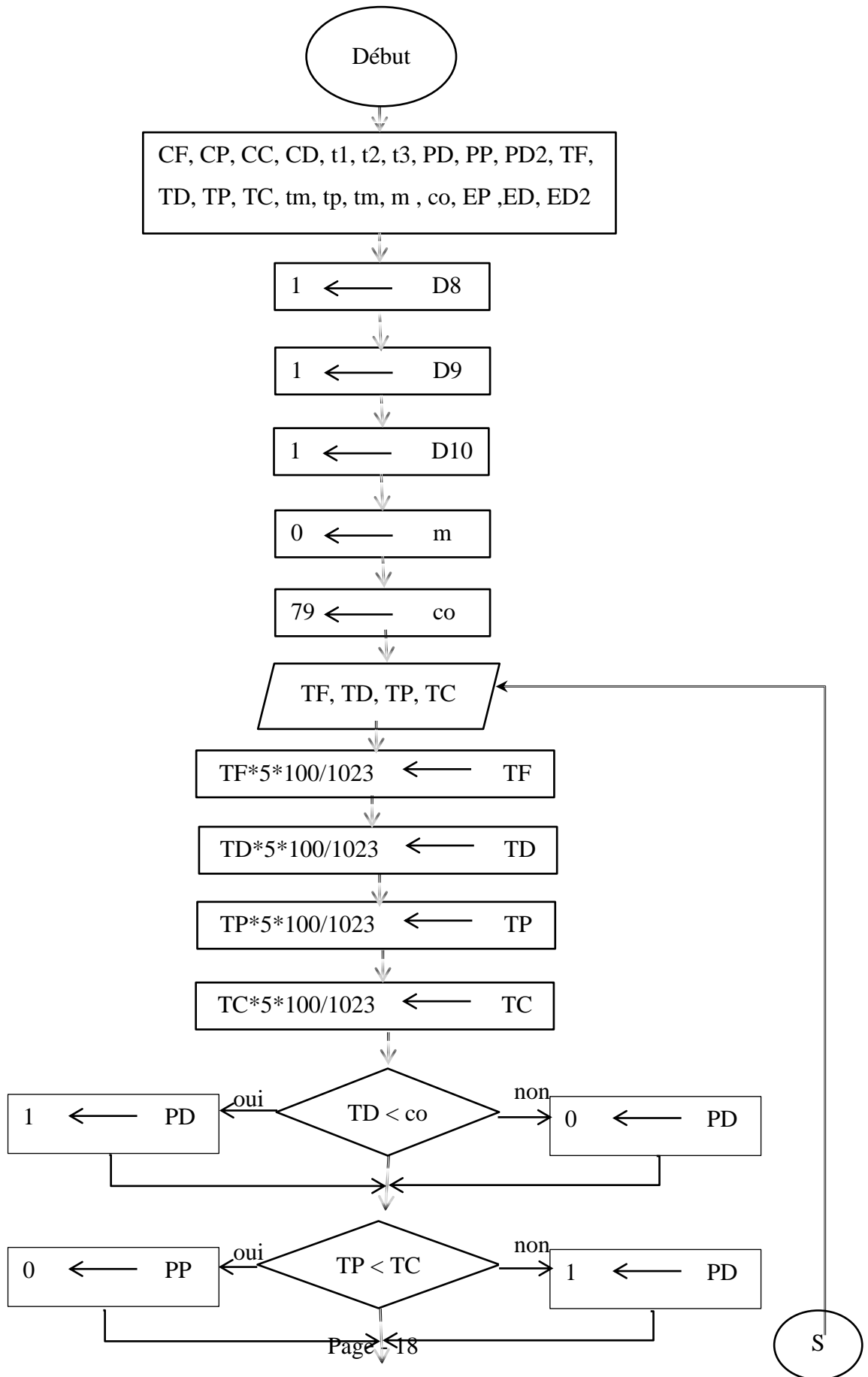


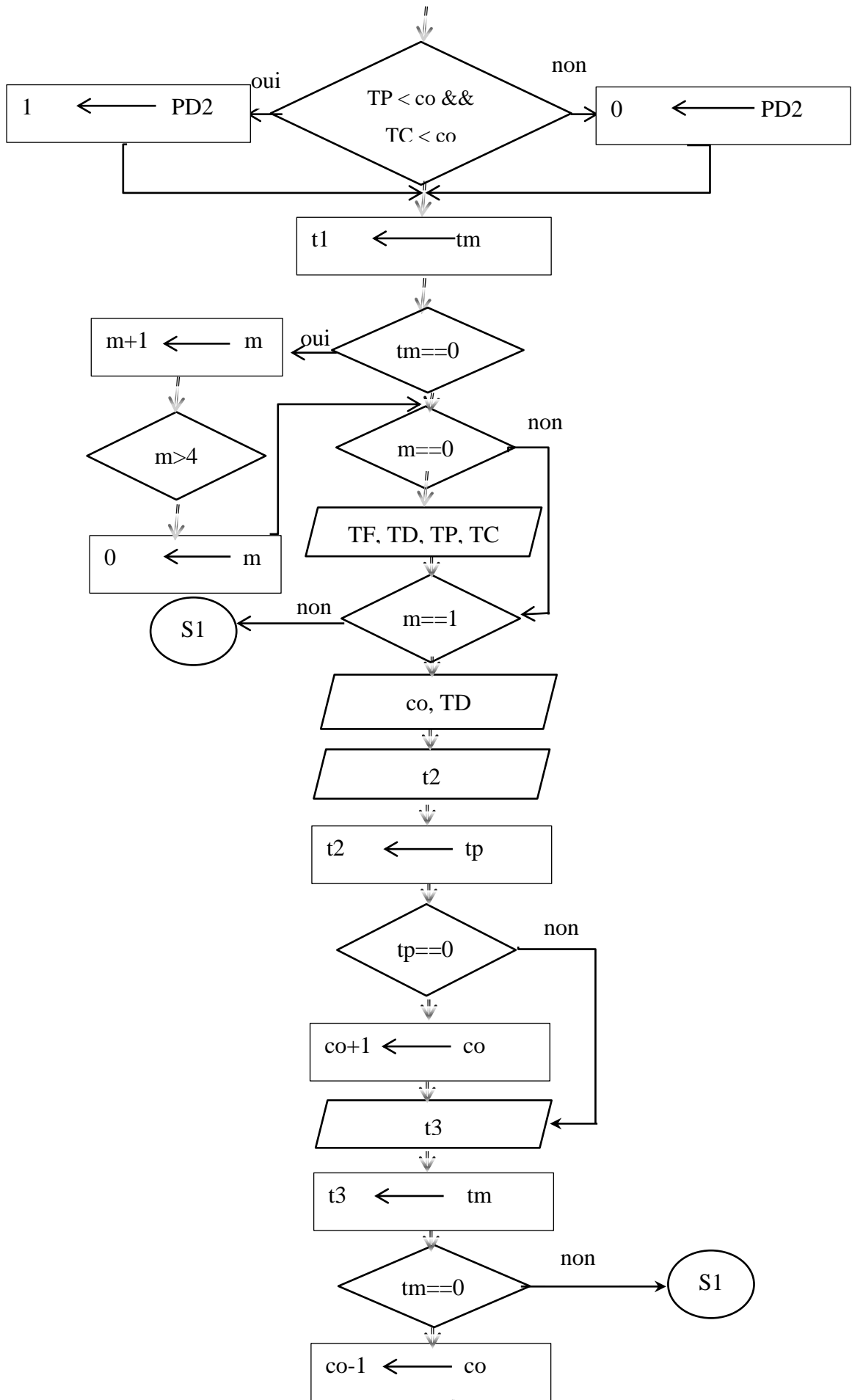
Figure 3.7.a. Vue de face du dispositif de pilotage électronique

a. Organigramme

Premièrement, le dispositif électronique mesure la température à l'intérieur des composants suivants : distillateur, capteur solaire, ballon de stockage et alambic.

Deuxièmement, il régule la température du distillateur aux environs de 78°C et contrôle l'isolation du panneau thermique selon le cas apparue. La résistance électrique joue le rôle d'une source d'appoint lorsqu'il n'y a pas d'ensoleillement.





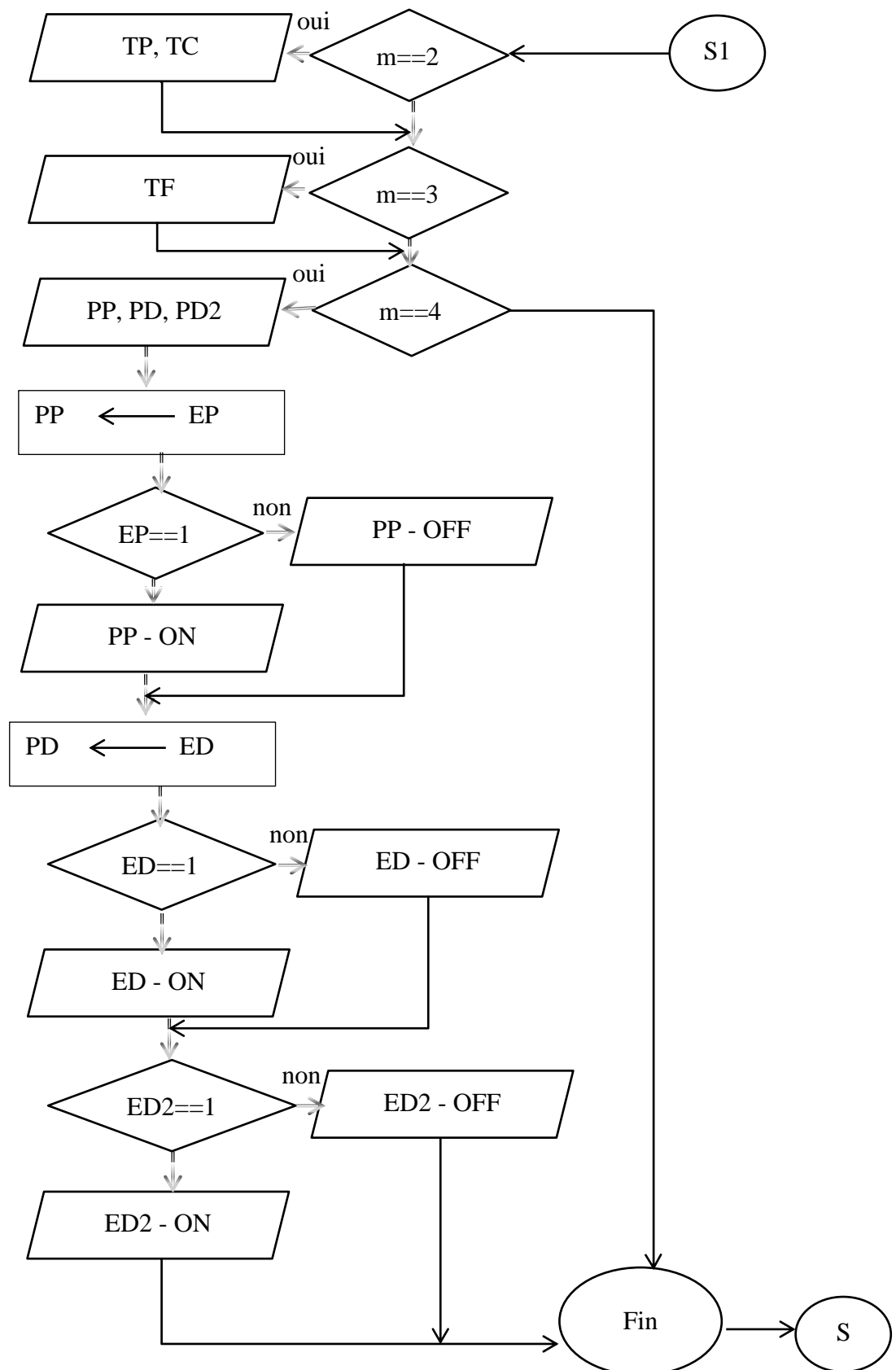


Figure 3.7.b. Organigramme de fonctionnement du dispositif électronique

Les significations de chaque variable manipulée au cours de l'organigramme sont :

CF : capteur thermique dans le fermenteur ;

CP : capteur thermique dans le panneau solaire thermique ;

CC : capteur thermique dans la chaudière ;

CD : capteur thermique dans le distillateur ;

t1 : touche N° 1 ;      t2 : touche N°2 ;      t3 : touche N°3 ;

PD : pompe entre distillateur et ballon de stockage ;

PP : pompe entre panneau et ballon de stockage ;

PD2 : résistance électrique dans la chaudière.

TF : température du fermenteur ;

TD : température du distillateur ;

TP : température du panneau ;

TC : température de la chaudière ;

tm : touche menu ;

tp : touche plus (incréméntation) ;

tm : touche moins (décréméntation) ;

m : numéro de menu ;

co : température de consigne

EP : état de la pompe du panneau ;

ED : état de la pompe du distillateur ;

ED2 : état de la résistance ;

Les ports utilisés sont

- A0, A1, A2 et A3 pour les entrées analogiques.
- D8, D9 et D10 pour les touches d'affichage et commande.
- D11, D12, D13 pour la commande de sortie.

D2, D3, D4, D5, D6 et D7 pour l'affichage

## b. Schéma de montage et simulation

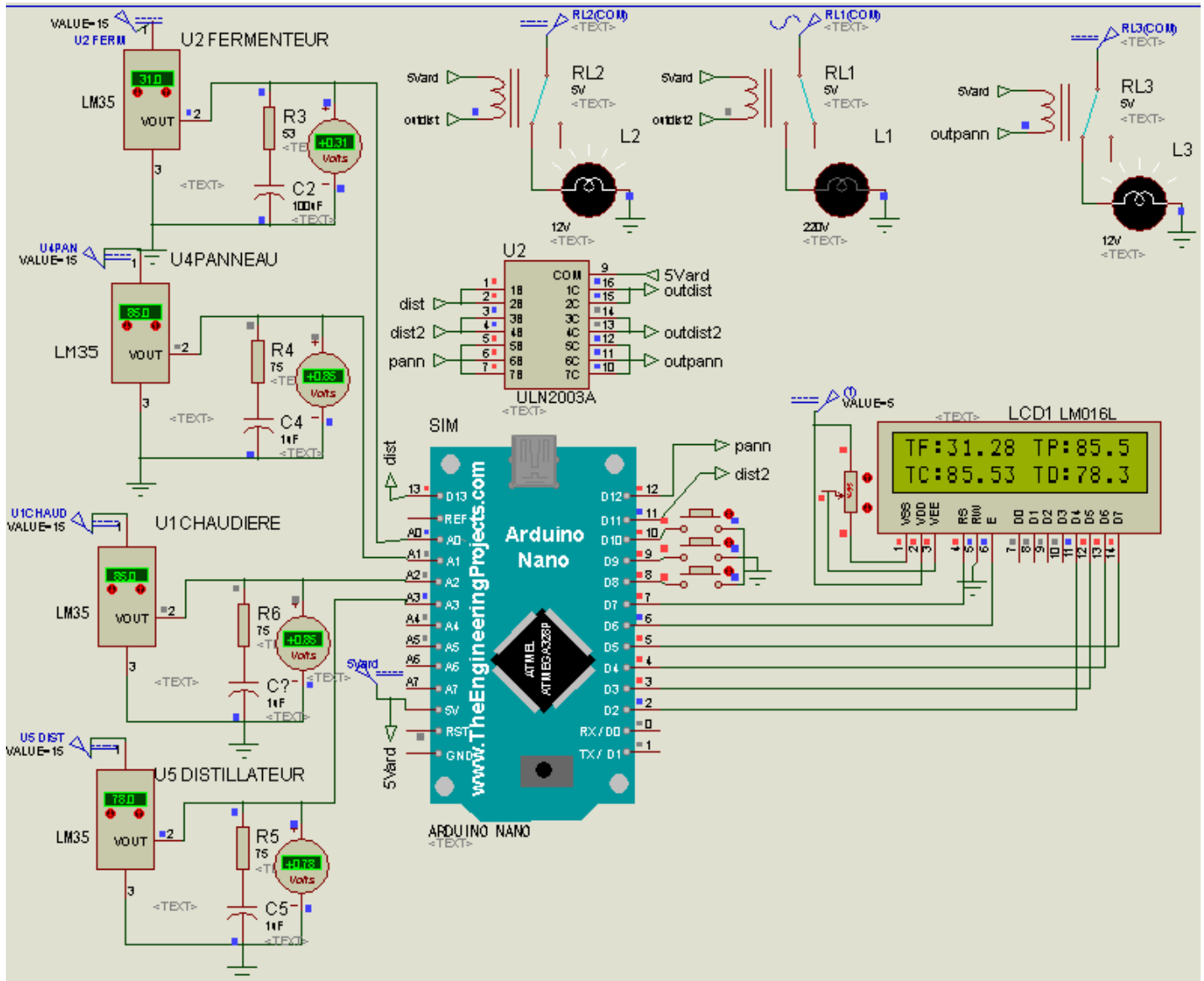


Figure 3.7.c. Schéma de simulation du système de pilotage [6]

## c. Principe de fonctionnement

Nous avons réalisé ce circuit sur *Isis Proteus*. Les LM35 jouent le rôle de capteur thermique. L'arduino convertit la tension envoyée par le LM35 (1V/100°C) en valeur numérique correspondant à la valeur de la température réelle.

Ensuite, l'arduino envoie des commandes vers l'ULN2003A. Après, L'ULN active ou désactive le relais pour faire fonctionner ou arrêter les charges de commande (L1 à L3 sur la simulation).

L'affichage sur l'écran LCD est en fonction du signal reçu par le biais des touches branchées sur le pin D8, D9 et D10.



## CHAPITRE IV :

### RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

---

#### 4.1. Etudes sur le processus de fermentation

##### 4.1.1. Influence de la nature de la levure utilisée

Etant donné que la transformation commence par la fermentation, nous avons fait des tests dans l'objectif de déterminer les conditions et paramètres influent à la fermentation, à savoir : la température, l'oxygène, les levures et l'agitation. Pour cela, nous avons utilisé 6,5 L de moût. Le moyen de caractérisation de bon déroulement ou non de la fermentation adopté est l'évaluation de la quantité de CO<sub>2</sub> dégagé lors de la réaction de fermentation.

Nous avons essayé d'utiliser les levures suivantes ; la levure boulangère (*saccharomyce cerevisiae*), banane, écorce de jujube et finalement le lantana comme source d'azote.

La fermentation se termine au quatrième jour avec la levure boulangère. Avec la banane et l'écorce de jujube, la fermentation s'arrête au troisième jour.

Nous avons ajouté de *lantana* avec le premier échantillon composé de la levure boulangère. En observant les résultats, il n'y a pas de dissemblance particulière.

En comparant la quantité de CO<sub>2</sub> dégagé pour ces trois échantillons, on en déduit que, la levure boulangère est la plus efficace et l'écorce de jujube est le moins efficace. La qualité de la banane est comprise entre les deux. Il est bien à noter que la mesure de la quantité de CO<sub>2</sub> est par évaluation sur le gonflement des bouteilles utilisées.

##### 4.1.2. Influence de la quantité de levure

Nous avons ajouté 2g/L de levure boulangère dans un cas et 6g/L dans un autre. Les autres variables sont identiques pour les deux. Tous les deux se finissent au soir du quatrième jour. Le premier dégage moins de CO<sub>2</sub> que le deuxième.

Donc la quantité de levure introduite influe sur le déroulement de la fermentation.

##### 4.1.3. Effet de la fermeture du fermenteur au premier jour :

Deux échantillons ont été comparés. Le premier a été enfermé dès son versement dans le fermenteur et le second n'a été mis à couvert qu'au deuxième jour. Les autres paramètres

sont les mêmes pour les deux. Tous les deux se terminent au début du quatrième jour. Il n'y a pas de différence significative sur la quantité de CO<sub>2</sub> dégagé.

Donc, nous pouvons dire à priori qu'il n'y a pas de différence significative si on ferme ou si l'on ouvre le fermenteur pendant le premier jour.

#### 4.1.4. Effet d'agitation

Nous avons également étudié l'influence de l'agitation du mélange pendant la fermentation. Après quatre jours de fermentation, nous n'avons pas noté de dissimilitude notable sur les résultats des fermentations avec et sans agitation. Ceci semble logique car le mélange étant homogène, les levures sont distribuées de manière uniforme dans tout le moût et la fermentation commence et a lieu de manière isotrope.

#### 4.1.5. Influence de la quantité de jus fermenté

L'objectif dans cette deuxième fermentation est de déterminer l'effet de quantité. On va comparer le résultat entre deux moûts de même composition mais de quantités différentes. Les fermentations de deux échantillons de 0,65 L et de 5 L se terminent présentent la même évolution et se terminent au même moment. Cela rejoint le propos mentionné dans le paragraphe ci-dessus. En effet, la fermentation se déclenche et se déroule de la même façon partout dans le fermenteur et il n'y a pas de notion de propagation.

Il n'y a donc pas d'effet d'échelle dès lors que les conditions opératoires sont les mêmes.

#### 4.1.6. Influence de la nature de jus fermenté

Dans cette troisième fermentation, nous avons disposé la cuve en bain marie dans une autre cuve. Ce système favorise l'évacuation automatique de CO<sub>2</sub> en bloquant l'entrée d'air et facilite la manipulation du système. L'objectif essentiel de cette étape est déterminer l'influence de la nature de jus, c'est-à-dire comparer le jus fabriqué avec de l'eau et du sucre commercial avec le jus obtenu par le pressage de canne à sucre.

Pour fabriquer le jus artificiel, on a utilisé 4 L d'eau mélangé avec 0,6kg de sucre, ce qui correspond à la teneur de 15% en sucre comme rapportée par la littérature. Le taux de levure ajouté est 6g/L.

Vingt minutes après l'ajout de la levure, le bouillonnement commence. L'évolution de la température au cours du déroulement de la transformation de sucre en éthanol est mentionnée sur le tableau suivant.

Tableau 4.1.6. Evolution de la température au cours de la fermentation

Heure (h)	0	1	2	12	13	22	28	30	33	36	37	43	47
Température (°C)	28	31,7	32	32	30,8	29,4	30,4	30,6	30	29,8	29	28	28

A partir de la 46<sup>ème</sup> heure du processus, il n'y avait plus de bouillonnement. Même en brassant rien n'a pas changé.

Ce test met en évidence que la température interne du moût au cours de la fermentation varie entre 29°C et 32°C. Cette plage de température résultante, qui n'est pas très éloignée par rapport à la température ambiante, est favorable à la fermentation. Ainsi, l'isolation de la cuve fermentative n'est pas indispensable pour garder une température propice à la multiplication et aux activités des bactéries.

En comparaison, nous avons utilisé 4,4 L de vesou de canne avec une concentration en 6g/L de levure. Il n'est pas très sucré.

Le bouillonnement commence après dix-huit (18) minutes d'ajout de levure avec une fréquence 7 bouillonnement /seconde. La température du fermenteur varie entre 32°C et 29°C. Le bouillonnement s'arrête après 12h de versement du vesou.

Nous avons alors ajouté du sucre 300g c'est-à-dire 7,5 % du volume. Après 10 min de versement nous avons constaté la reprise de bouillonnement, avec une fréquence de 3 bouillonnement /seconde. La durée de la fermentation se termine vers la 37<sup>ème</sup> heure de la fermentation.

Cette quatrième fermentation confirme que le taux de sucre contenu dans le vesou introduit dans la cuve fermentative est faible, qui se traduit par un peu de bouillonnement parce que les cannes utilisées sont encore jeunes. . La qualité des cannes sont donc d'une importance capitale pour la fermentation et le rendement de production du bioéthanol.

Cette dernière fermentation permet trouver la capacité de production du système réalisé en se référant au volume du distillateur. Nous avons fermenté un moût 12 L de canne à sucre en ajoutant 96 g de *saccharomyce cerevisiae*.

#### 4.2. Distillations

Nous avons effectué cinq distillations différentes.

Pour la première distillation, nous avons utilisé un simple alambic fait maison sans régulation thermique dans lequel nous avons versé 6,5 L de moût. Le taux d'alcool obtenu varie entre 20°GL et 65°GL. En faisant la moyenne nous avons 1,5 L d'alcool à 50,25°GL. Le volume de vinasse récupéré à la fin de la distillation est 4,9 L.

Nous avons donc perdu  $6,5\text{L} - 1,5\text{L} - 4,9\text{L}$ , soit  $0,1\text{L}$  à cause des fuites au niveau du distillateur. Le rendement de production en éthanol est donc  $12,87\%$ .

Nous avons versé  $5\text{L}$  de moût pour la deuxième distillation. L'éthanol obtenu est titré de  $61^\circ\text{GL}$  à  $40^\circ\text{GL}$ . Le calcul moyen donne  $1,1\text{L}$  d'éthanol titré de  $52,4^\circ\text{GL}$ . Le rendement de production est  $12,83\%$ . Nous retrouvons ainsi le même rendement de production en éthanol qu'auparavant.

En redistillant trois fois l'alcool obtenu avec ces deux distillations, nous avons  $1\text{L}$  d'alcool de  $90^\circ\text{GL}$ .

Ces deux premières expériences permettent de dire que  $11,5\text{L}$  de jus de canne. Donne  $1\text{L}$  d'alcool à  $90^\circ\text{GL}$ . Le rendement obtenu est donc de  $8,69\%$  et le taux de perte entre la première distillation et les redistillations est  $2,88\%$ . Pour avoir un alcool plus de  $90^\circ\text{GL}$  sans régulateur thermique, il faut faire trois distillations successives.

Nous pouvons en déduire que les cannes utilisées à la première et à la deuxième fermentation possèdent une teneur en sucre supérieur à  $15\%$ .

Une troisième distillation avec un moût à base de sucre de table ( $0,6\text{kg}$  dans  $4\text{L}$  d'eau) a été réalisée afin de déterminer l'influence de la nature du jus fermenté. Le résultat donne :  $0,25\text{L}$  à  $65^\circ\text{GL}$  et  $0,24\text{L}$  à  $43^\circ\text{GL}$ . Le volume de la vinasse restant dans l'alambic vaut  $3,3\text{L}$ .

Ce résultat permet de dire que :

- Théoriquement nous avons  $0,6 \times 0,5 = 0,3\text{ kg}$  d'éthanol équivaut à  $0,3/0,76 = 0,39\text{ L}$  d'éthanol.
- La quantité produite est :  $0,25 \times 0,65 + 0,24 \times 0,43 = 0,26\text{L}$ .
- Le rendement de production est :  $4 \times 0,26/0,9 = 1,15\%$ .

La perte en volume est de :  $4\text{L} - 3,3\text{L} - 0,24\text{L} - 0,25\text{L} = 0,21\text{L}$

Le décalage entre le calcul théorique et la réalité est  $0,39 - 0,26 = 0,04\text{L}$

Pour la suite, nous avons intégré le système de régulation de température dans le processus de distillation. Le volume du moût initial lors de la quatrième distillation est de  $4,4\text{L}$ . Nous en avons recueilli  $0,3\text{L}$  d'alcool à  $60^\circ\text{GL}$  et  $0,39\text{L}$  à  $40^\circ\text{GL}$  avec  $3,47\text{L}$  de vinasse.

L'alcool recueilli faisant:  $0,3\text{L} + 0,39\text{L} = 0,69\text{L}$  ; la perte en volume est de  $4,4\text{L} - 3,47\text{L} - 0,69\text{L} = 0,24\text{L}$ . Le rendement de production est ainsi de  $8,47\%$ .

Ce faible rendement, associé au temps de bouillonnement très court par rapport aux autres fermentations, nous laisse supposer que les cannes utilisées pour cette étape sont encore des jeunes cannes.

Nous avons mélangé les produits obtenus à la troisième distillation et à la quatrième distillation et nous avons obtenu un alcool de 2,2 L à 45°GL. L'alcool qui sort au début de la récupération est titré de 86°GL. Le produit final après redistillation donne 0,85 L d'éthanol à 91°GL et 1,2 L de vinasse.

Alors, le rendement de distillation est  $0,85 \times 0,91 \times 100/2,2 = 35\%$  Et la perte en volume est  $2,2 - 0,85 - 1,2 = 0,15$  L

Pour la cinquième distillation, nous avons versé 12 L de moût. Le résultat obtenu donne 1,65 L d'alcool à 83°GL. Le premier recueil est titré de 86°GL. Après redistillation nous avons obtenu 1,2 L d'alcool à 92°GL. Le rendement de production lors de dernière distillation est de 10%.

#### Conclusions :

Les pertes pendant la distillation en utilisant l'alambic définitif que nous avons confectionné sont aux environs de 0,20 L par distillation. Ces pertes proviennent du joint hydraulique et de l'évacuation de vapeur de méthanol lors du début de l'évaporation, mais aussi de la volatilité de l'éthanol lors de sa récupération.

Le rendement de production d'alcool trouvé varie entre 12,87% et 8,47%.

Pour avoir un alcool de plus de 90°GL, une deuxième distillation est nécessaire avec le système comportant un régulateur thermique (sans cette régulation, il faut la répéter trois fois).

#### 4.3. Evolution de la température dans les différentes parties du système

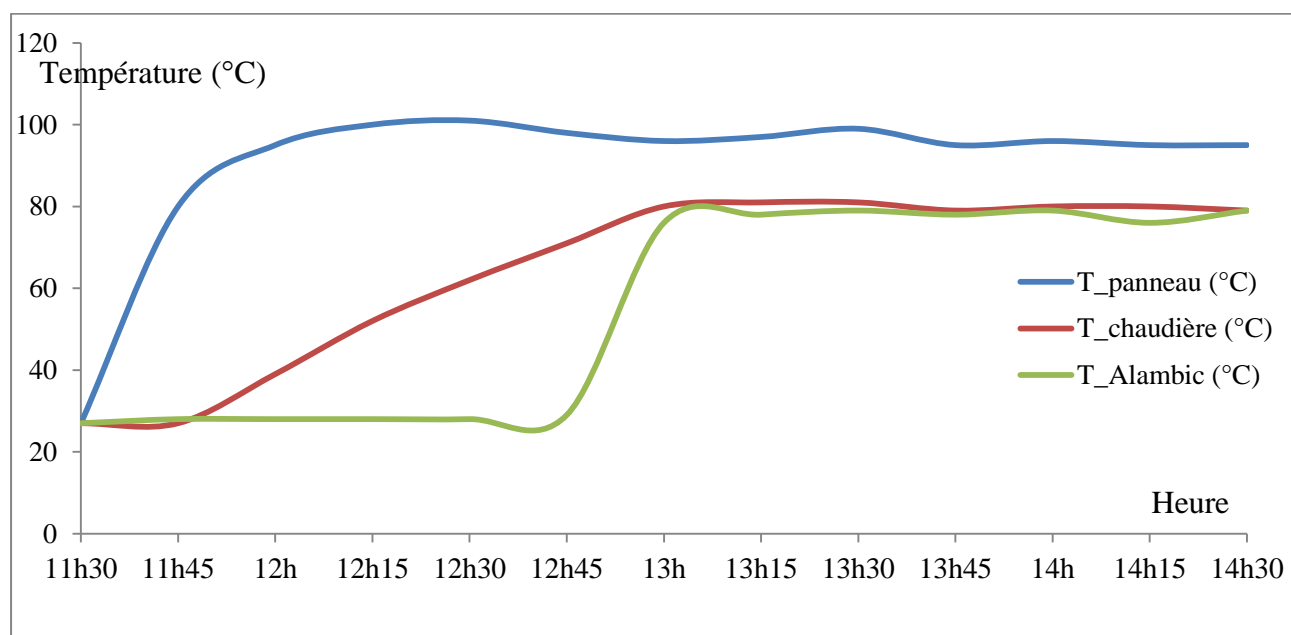


Figure 4.3. Evolution de la température de chaque sous système

Les premières acquisitions, à une fréquence de 15mn, donnent une montée en température avec des écarts en oscillations entre 8 et 10°C par un intervalle de quart-heure. Le pic maximum est entre 12h 15 et 12h 30. Après une heure et demie d'exposition au rayon solaire, la température se sature à 71°C. Donc la température d'ébullition de l'éthanol n'est pas encore atteinte.

Après avoir fait des corrections sur le capteur solaire, par renforcement du contact entre le serpentin et le corps noir, et consolidation de joint, La température se sature à 81°C et permet alors d'évaporer l'éthanol dans l'alambic.

La température du corps noir varie entre 95°C et 101°C, donc nous avons perdu le 18% (valeur moyenne) de la température donnée par le corps absorbant. Ces pertes viennent de l'utilisation du simple vitrage et à la qualité d'isolation des tuyaux de circulation vers la chaudière.

La température maximale dans la chaudière est de 81°C. Lors du passage de l'eau chaude dans le serpentin dans l'alambic elle a perdu environs 2°C par rapport à sa température initiale. L'autonomie de la chaudière pour chauffer l'alambic sans énergie solaire est de 1h.

Pour le capteur solaire, nous avons mis comme hypothèse dans le calcul, que la température moyenne du fluide dans la chaudière est 85 C; mais la réalité nous donne de 81°C. Donc nous avons eu une perte de 4°C due à la circulation des fluides.

#### 4.4. Utilisation du mélange Essence-Ethanol

##### Influence de la proportion d'éthanol dans le mélange :

Nous avons utilisé un groupe électrogène 750 W pour essayer le produit obtenu lors des expériences. La charge utilisée au cours de cette démarche est une perceuse de 600W. Le temps de fonctionnement de chaque essai vaut dix (10) minutes. Nous avons constaté que le mélange essence-éthanol-huile 2T n'est pas tout à fait homogène à cause de la présence de petite portion d'eau dans l'éthanol.



Figure 4.4. Groupe utilisée pour le test

Tableau 4.4 : Evolution de la consommation avec différentes proportions d'éthanol - essence

Echantillons	Consommations (ml)	
	A vide	En charge
Essence pure	60	76
E10	72	74
E30	100	127
E50	65	86
E90	60	84
E100	92	

Pour chaque augmentation de taux d'éthanol dans le carburant nous avons augmenté la richesse. En plus, après un long arrêt nous avons vidé le carburateur. Nous avons perdu 10V sur l'utilisation de l'essence pure et l'E100.

Nous avons constaté une augmentation de température de la bougie d'allumage au fur et à mesure que le taux d'éthanol augmente. Il y a moins d'odeur lors du fonctionnement en E90 qu'en essence pure.

En effet, une surconsommation de 21% est observée en charge à l'essence pure.

Le moteur tourne bien jusqu'à l'ajout de 90% en éthanol sur l'essence. Tandis qu'au-delà de cette valeur il ne peut pas satisfaire, à cause de l'architecture du moteur non adapté à la propriété de l'éthanol.

Nous avons une consommation pareille en utilisant l'essence pure et l'E90 à vide. En charge, nous avons un rapport de 0,9 (essence pure/E90).

En E90, nous avons une surconsommation de 30% en charge. Sur l'utilisation de l'essence pure et en éthanol pur nous avons un rapport de 65%. C'est-à-dire en E100, on consomme plus qu'en essence.

#### 4.5. Coût des matériels utilisés

Tableau 4.5 Listes et prix des matériels nécessaires

Désignations	Prix (Ar)
Pilotage électronique	112 500
Fermenteur	24 000
Capteur solaire thermique	90 500
Chaudière	23 500
Alambic	128 000
Divers	24 000
TOTAL	402 500



## CONCLUSION GENERALE

---

Le travail que nous avons rapporté dans cet ouvrage a eu comme objectif de montrer la faisabilité d'une valorisation écologique et simple de la biomasse à Madagascar. Nous avons choisi la valorisation des cannes à sucres en éthanol en utilisant uniquement l'énergie solaire. La grande disponibilité de cette source d'énergie propre, ainsi que la simplicité du dispositif développé permettent une vulgarisation et une exploitation du système afin que les micros collectivités puissent s'en inspirer et en tirer profit.

Malgré sa simplicité, la mise en place des différentes parties nécessite de passer par des études techniques et scientifiques permettant la conception et l'optimisation. De la fermentation jusqu'à la distillation, les études paramétriques que nous avons menées ont permis de distinguer les facteurs importants et définir leurs valeurs optimales.

En outre, la réalisation de ce mémoire m'a donné une bonne expérience et m'a fourni de nombreuses compétences qui pourront me servir dans d'autres sujets et même dans d'autres domaines.

Au cours de l'utilisation avec le groupe à essence nous avons montré que jusqu'à l'ajout de 90% de l'éthanol dans l'essence le groupe fonctionne bien. Cependant, on peut utiliser l'E100 dans le groupe à éthanol comme le cas de l'AIDER dans la commune rurale de Milenake District Tuléar. En général, le résultat de ce travail est satisfaisant mais quelques améliorations peuvent encore apportées. L'enregistrement des toutes les températures au niveau de chaque sous système est intéressant. Il est préférable d'utiliser un joint d'étanchéité au lieu de joint hydraulique, car une partie de vapeur d'éthanol se condense la dedans. Dans le cas où on va utiliser ce système dans les régions hors réseau électrique, on peut l'accoupler à de panneau photovoltaïque pour fournir le petit besoin en énergie électrique. La valorisation du sous-produit, bagasse formant le 30% de la masse de la canne à sucre est aussi intéressante

## REFERENCES

---

### REFERENCES WEBOGRPHIQUES

- [1]. – CNRIT : <http://cnrit.recherches.gov.mg>, consulté le 12 Janvier 2016
- [2]. « Le deux temps et les biocarburants », cahier technique, disponible sur « <http://www.dkw-elge.com/doc20.htm> », consulté le 20 Novembre 2015
- [3]. BEN CHAABANE Mohamed Fadhel, 2006, « Intensification de la production d'éthanol biocarburant dans un bioréacteur bi-étagé avec recyclage cellulaire : modélisation et stratégie de conduite », thèse à l'INSA Toulouse, 290 pages, disponible sur « [http://eprint.insa-toulouse.fr/98/1/ben\\_chaabane.pdf](http://eprint.insa-toulouse.fr/98/1/ben_chaabane.pdf) » consulté le 15 Novembre 2015.
- [4]. Centre Malgache de la Canne et Sucre,  
[http://www.canneasucres.mg/index.php/8\\_filiere\\_sucres/3\\_plantation\\_de\\_lacanne](http://www.canneasucres.mg/index.php/8_filiere_sucres/3_plantation_de_lacanne)
- [5]. « fermentation », disponible sur :  
[http://www.fairesagnole.eu/homedistiller\\_fr/ferment.htm](http://www.fairesagnole.eu/homedistiller_fr/ferment.htm) (12 Décembre 2015)
- [6]. [www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/8866NSC/LM35.html](http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/8866NSC/LM35.html) 28 Octobre 2016
- [7]. « dimensionnement des équipement solaire », disponible sur <http://www.tecsol.fr/Lettres/articles/Documents/ECSsolaire3.pdf> word consulté le 30 Janvier 2016.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [8]. Solofoandrianiaina PHARLIN, 2001: « Etudes de condition d'obtention de vin de fermentation – conception d'une cuve d'hydrolyse et d'une cuve de fermentation ». Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, Ecole Polytechnique, Université d'Antananarivo.

Auteur : RAKOTOMALALA Jean François

Titre : « PRODUCTION DE BIOETHANOL A PARTIR DE LA CANNE A SUCRE :  
REALISATION D'UN PROTOTYPE UTILISANT L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE »

Nombre de pages : 32

Nombre de tableaux : 05

Nombre de figures : 09

## RESUME

Le présent ouvrage porte sur la production de bioéthanol en utilisant la canne à sucre comme matière première. L'énergie solaire thermique est la source de chaleur utilisée pour la distillation. Le fermenteur, l'alambic, le capteur solaire thermique et la chaudière ont été réalisés afin de mettre en place un prototype démontrant l'efficacité du système conçu. Les flux de chaleur entre les différents constituants du système sont pilotés par un dispositif électronique et des électrovannes. Les différents facteurs qui influent sur les étapes du procédé ont été étudiés. La température maximale obtenue au sein de la chaudière est de 81°C. Nous avons obtenu un rendement de production en éthanol compris entre 8,5% et 12,87% au niveau de la distillation. L'utilisation de l'éthanol obtenu mélangé avec l'essence SP95 dans un groupe électrogène est satisfaisante jusqu'à un taux de 90%.

Mots clés: Canne à sucre, levure, distillation, alambic, capteur solaire, éthanol

---

## ABSTRACT

This work deals with the bioethanol production from sugarcane. Solar thermal energy is used as heat source for the distillation. We have made the fermentor, the still, the solar thermal collector and the boiler in order to make the prototype showing the system efficiency. The system is controlled by an electronic device. We performed studies on the various factors governing the process. The maximum temperature recorded in the boiler is 81°C. The distillation produces ethanol with an efficiency of 8.5 to 12,87%. Adding the ethanol to the usual SP95 gasoline for supplying a generator is suitable up to a rate of 90%.

Keywords: Sugar cane, yeast, distillation, still, solar collector, ethanol

Lieu de stage : Centre National de  
Recherche Industrielle et Technologique  
Adresse : Rue Rasamimanana,  
Fiadanana Tsimbazaza Antananarivo101

Adresse de l'auteur : Campus Universitaire,  
Ankatso 2, bloc 64/5, Antananarivo 101  
Tel : +261 34 37 984 27/+261 33 03 419 49  
Adresse mail : rafranc29@gmail.com