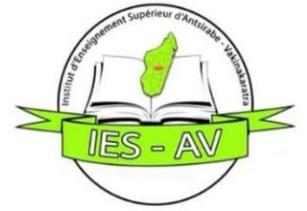




UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO  
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
D'ANTSIRABE-VAKINANKARATRA



MENTION GÉNIE INDUSTRIEL

PARCOURS : SCIENCE ET TECHNIQUE EN GENIE DES PROCÉDES

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de  
LICENCE EN GÉNIE DES PROCÉDÉS CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

# « CONTRIBUTION À LA VALORISATION DES DÉCHETS DE FRUITS EN BIOCARBURANTS »



**Présenté par : Anjarasoa Rosina RAVOLONIRINA**

Soutenu le 27 Août 2019

Promotion 2018



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO  
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
D'ANTSIRABE-VAKINANKARATRA



MENTION GÉNIE INDUSTRIEL

PARCOURS : SCIENCE ET TECHNIQUE EN GENIE DES PROCÉDES

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de  
LICENCE EN GÉNIE DES PROCÉDÉS CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

# « CONTRIBUTION À LA VALORISATION DES DÉCHETS DE FRUITS EN BIOCARBURANTS »



**Présenté par : Anjarasoa Rosina RAVOLONIRINA**

Soutenu le 27 Août 2019

**Membre de jury :**

**Président :** Docteur Daniel RABIBISOA

**Rapporteur :** Monsieur Noëlson RANAIVOSAMOELINA

**Examineurs:** Docteur Philippine ELISOAMIADANA  
Monsieur André RAZAFIMANDEFITRA

## Remerciements

Je rends grâce à Dieu qui a veillé sur moi tout au long de ma vie, sans qui tous mes efforts seraient vains.

J'ai énormément de gratitude et de reconnaissance à adresser à :

- Monsieur *Eddie Franck RAJANARISON*, Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra, qui m'a permis d'effectuer mes études au sein de son établissement ;
- Monsieur *Elie Rijatiana Hervé RAVONISON*, Chef de Département Génie Industriel à l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra ;
- Monsieur *Richard Nambinina Fortuné RANDRIANA*, Professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Chef de Département Génie Chimique de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et responsable des parcours à l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra , de nous avoir permis de soutenir le présent mémoire.

Je voudrais exprimer, à travers ces quelques lignes, mes remerciements les plus vifs, et témoigner ma gratitude aux honorables enseignants qui ont bien voulu de bonne grâce faire partie du jury, à :

- Monsieur *Daniel RABIBISOA*, Maître de conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique de l'Université d'Antananarivo, qui nous fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance ;
- Madame *Philippine ELISOAMIADANA*, Maître de conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique de l'Université d'Antananarivo, d'avoir accepté de faire partie des membres de jury ;
- Monsieur *André RAZAFIMANDEFITRA*, Assistant d'E.S.R. et Enseignant-Chercheur dans le Département de Génie Chimique de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui en plus de siéger en tant qu'examinateur de ce travail nous a aimablement prêté ses matériels pour nos essais expérimentaux ;

- Monsieur *Noëlson RANAIVOSAMOELINA*, Assistant d'E.S.R et Enseignant-Chercheur au sein de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, rapporteur de ce travail, pour ses conseils, son aide et ses encouragements, malgré ses nombreuses occupations.

Je tiens également à remercier sincèrement Monsieur *Edouard Ravalison ANDRIANARISON*, Professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui nous a fait part de ses expériences et nous a aimablement prêté ses matériels pour nos essais expérimentaux.

Je tiens aussi à témoigner ici ma grande reconnaissance à tous les enseignants de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra plus particulièrement à ceux du département Génie Industriel.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur *Prosper ANDRIAMALALA* et tout le personnel de laboratoire du Département Génie Chimique de l'Ecole Supérieure Polytechnique.

Finalement, j'adresse mes cordiaux remerciements à mes parents, à mon frère et à tous les membres de ma famille, ainsi qu'à mes collègues et à tous ceux qui m'ont soutenu aimablement pour réaliser ce mémoire.

# Sommaire

## *Introduction générale*

### **PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

Chapitre I : Généralités sur les biocarburants

Chapitre II : Généralités sur les fruits

Chapitre III : Le bioéthanol

Chapitre IV : Processus de fabrication du biocarburant

### **DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE**

Chapitre V : Traitements préliminaires

Chapitre VI : Fermentation alcoolique

Chapitre VII : Distillations et déshydratation

Chapitre VIII : Analyse chromatographique en phase gazeuse

Chapitre IX : Essai de production d'EEHV

## *Conclusion générale*

## Liste des abréviations

ADP	: Adénosine diphosphate
ATP	: Adénosine triphosphate
C <sub>A</sub>	: Concentration de l'acide
C <sub>B</sub>	: concentration de la base
CPG	: Chromatographie en phase gazeuse
EEHV	: Esters Ethylique d'Huiles Végétale
EMHV	: esters Méthyliques d'Huiles Végétales
ETBE	: Éthyl Tertio Butyl Éther
FD	: facteur de dilution
FFV	: Flexible Fuel Vehicules
HVO	: <i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>
MON	: Indice s'octane moteur)
NAD	: nicotinamide adénine dinucléotide
NAD <sup>+</sup>	: forme oxydée du nicotinamide adénine dinucléotide
NADH	: forme réduite du nicotinamide adénine dinucléotide
PCI	: pouvoir calorifique inferieur
P <sub>i</sub>	: phosphate inorganique
RON	: Indice d'octane recherché
V <sub>A</sub>	: Volume de l'acide
V <sub>B</sub>	: Volume de la base

## Liste des unités et notations

°	: Degré
°GL	: Degré Gay-Lussac
d	: Densité
d <sub>biodiesel</sub>	: Densité par rapport à l'eau du biodiesel
ρ	: Masse volumique
%vol	: Pourcentage volumique
g	: Gramme
g/l	: Gramme par litre

kg : kilogramme  
kJ : Kilojoule  
kPa : kilopascal  
l : litre  
m : masse  
ml : millilitre  
mol/ : litre  
 $\eta$  : rendement  
n : indice de réfraction  
 $T_{\text{éb}}$  : température d'ébullition

## Liste des figures

Figure 1: Progression de la production d'éthanol carburant et de biodiesel (EMHV et HVO) par zone .....	4
Figure 2 : Evolution du nombre de projets d'agrocarburant à Madagascar depuis 2003.	4
Figure 3 : Les deux grandes filières de production des biocarburants .....	5
Figure 4 : Production des biocarburants de première génération.....	7
Figure 5 : Production des biocarburants de deuxième génération .....	8
Figure 6 : Production des biocarburants de troisième génération .....	10
Figure 7 : Répartition des macronutriments pour 100g de chaque fruit.....	18
Figure 8 : Une molécule d'éthanol.....	20
Figure 9 : production de bioéthanol de première génération .....	23
Figure 10 : Production de bioéthanol cellulosique .....	24
Figure 11 : Procédé de fabrication de l'ETBE.....	27
Figure 12 : Équation biochimique de la fermentation alcoolique .....	35
Figure 13 : Montage de la distillation simple.....	38
Figure 14 : Montage de la distillation fractionnée .....	39
Figure 15 : Procédé de fabrication du bioéthanol .....	43
Figure 16 : Courbe densité en fonction du temps.....	49

## Liste des photos

Photo 1 : Ananas.....	15
Photo 2 : Orange.....	15
Photo 3 : Papayes.....	15
Photo 4 : Pommes.....	16
Photo 5 : Stérilisation du jus.....	45
Photo 6 : Les fermenteurs F1, F2, F3.....	47
Photo 7 : Lecture du degré d'alcool avec un alcoomètre.....	49
Photo 8 : Montage de la distillation fractionnée.....	51
Photo 9 : mise en étuve de la chaux et chaux activée.....	53
Photo 10 : flamme observé lors de la combustion de l'éthanol obtenu.....	55
Photo 11 : Ethanol obtenu.....	55
Photo 12 : Matières premières pour la fabrication du biodiesel.....	58
Photo 13 : mélange après agitation.....	58
Photo 14 : Séparation des phases dans une ampoule à décanter.....	59
Photo 15 : Ester Ethylique d'huile Végétal obtenu.....	59

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Données botaniques des fruits étudiés.....	14
Tableau 2 : Composition nutritionnelle des fruits étudiés .....	19
Tableau 3 : Propriétés physiques de l'éthanol.....	21
Tableau 4 : les unités de mesure du degré alcoolique .....	22
Tableau 5 : Propriétés de l'éthanol par rapport à l'essence .....	24
Tableau 6 : Formulations courantes pour les moteurs à combustibles éthanoliqes ....	28
Tableau 7 : Classification biologique de la levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	30
Tableau 8 : Composition approximative de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> en macroéléments .....	31
Tableau 9 : Composition approximative de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> en ions métalliques, besoins et limites dans le milieu .....	31
Tableau 10 : Rendement du jus obtenu .....	44
Tableau 11 : Paramètres de fermentation analysés .....	45
Tableau 12 : Mesure de la densité pendant la fermentation.....	48
Tableau 13 : Degré alcoolique à la fin de la fermentation .....	50
Tableau 14 : Mode de récupération du distillat.....	52
Tableau 15 : résultat de la distillation d1 .....	52
Tableau 16 : résultat de la distillation 2 d2 .....	52
Tableau 17 : résultat de la déshydratation avec la chaux.....	54
Tableau 18 : Résultat de la déshydratation par ajout d'acétate d'éthyle .....	54

## **Introduction générale**

La recherche d'un projet efficace pour un développement durable visant la non dépendance énergétique et luttant contre la dégradation de l'environnement demeure l'objectif primordial actuel de tout pays, notamment Madagascar.

La dépendance extérieure pour son approvisionnement en énergie entraîne des instabilités sociales et économiques. L'augmentation du prix du pétrole et la crainte d'un épuisement des ressources ont incité de nombreuses études sur la recherche de nouvelles sources d'énergie renouvelable comme les biocarburants. Cependant, les limites actuelles liées à la production de ces derniers sont nombreuses, particulièrement la production des matières premières en concurrence avec la consommation humaine ainsi que la production coûteuse nécessitant des techniques sophistiquées provoquant par la suite des bilans environnementaux aussi néfastes que ceux des carburants fossiles.

Face à cela et dans le but de valoriser les déchets afin d'assainir notre planète, nous avons opté pour des déchets de fruits : une matière première riche en saccharose, glucose et fructose qui sont directement fermentescibles sans étapes complexes de transformations préalables comme matière première pour la production du biocarburant. D'où l'intitulé de cette présente étude : « CONTRIBUTION À LA VALORISATION DES DÉCHETS DE FRUITS EN BIOCARBURANTS ».

Le présent mémoire comporte deux parties : la première partie relate l'étude bibliographique et la deuxième partie consiste à présenter la réalisation expérimentale.

**PREMIÈRE PARTIE :**  
**ÉTUDE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

## **Chapitre I : Généralités sur les biocarburants [11] [12] [1] [13] [14] [5] [7]**

### **I.1. Définition**

Les biocarburants sont des carburants issus de matières organiques végétales renouvelable ou biomasse contrairement à ceux issus des énergies fossiles. Ils sont destinés au moteur thermique pouvant se substituer partiellement ou totalement aux carburants pétroliers.

L'appellation « agrocarburant » existe également et apparaît plus souvent dans le domaine de l'écologie pour ne pas créer de confusion avec la dénomination « bio » qui évoque l'agriculture biologique en fonction de la matière première utilisée et du produit fini souhaité.

Le terme « algocarburant » existe aussi pour dénommer ceux issus des microalgues.

### **I.2. Historique**

L'utilisation des biocarburants remonte à la naissance de l'industrie automobile. D'ailleurs, les premiers moteurs ne sont pas encore destinés aux énergies fossiles comme le pétrole. En 1826, Samuel Morey utilisait l'éthanol mélangé avec de la térébenthine (une oléorésine récoltée à partir des arbres résineux) comme carburant pour son invention, un moteur à combustion interne. Puis en 1876, Nikolaus Otto, inventeur du moteur à explosion avait conçu cette invention pour fonctionner avec de l'éthanol. De son côté, en 1900, Rudolf Diesel, utilisait de l'huile d'arachide pour faire fonctionner son premier moteur à allumage par compression. Enfin la très célèbre Ford T (produite de 1903 à 1926), inventée par Henry Ford, roulait quant à elle totalement au bioéthanol.

Au milieu du XXe siècle, les caractères abondant et peu cher du pétrole provoquait un désintérêt des industriels pour les biocarburants.

Les deux chocs pétroliers successifs en 1973 et 1978 ont ensuite relancé l'intérêt pour les biocarburants, pour des questions stratégiques et économiques.

Le premier grand programme de production d'éthanol à partir de la canne à sucre « Proalcool » a été lancé par le gouvernement brésilien en 1975 suivi par des programmes aux États-Unis en 1978 et au Canada par la suite.

Depuis 2000 et jusqu'à nos jours, les biocarburants ont trouvé leur place en tant que source alternative aux carburants fossiles. En effet, l'essor de cette filière de production

s'explique par la nécessité de lutter contre la destruction de l'environnement ainsi que la fluctuation sans cesse du prix de baril.

Le bioéthanol ou éthanol carburant et le biodiesel (EMHV et HVO) sont parmi les produits développés commercialement dans le monde entier, et leur production ne cesse de progresser comme illustre les figures suivantes.

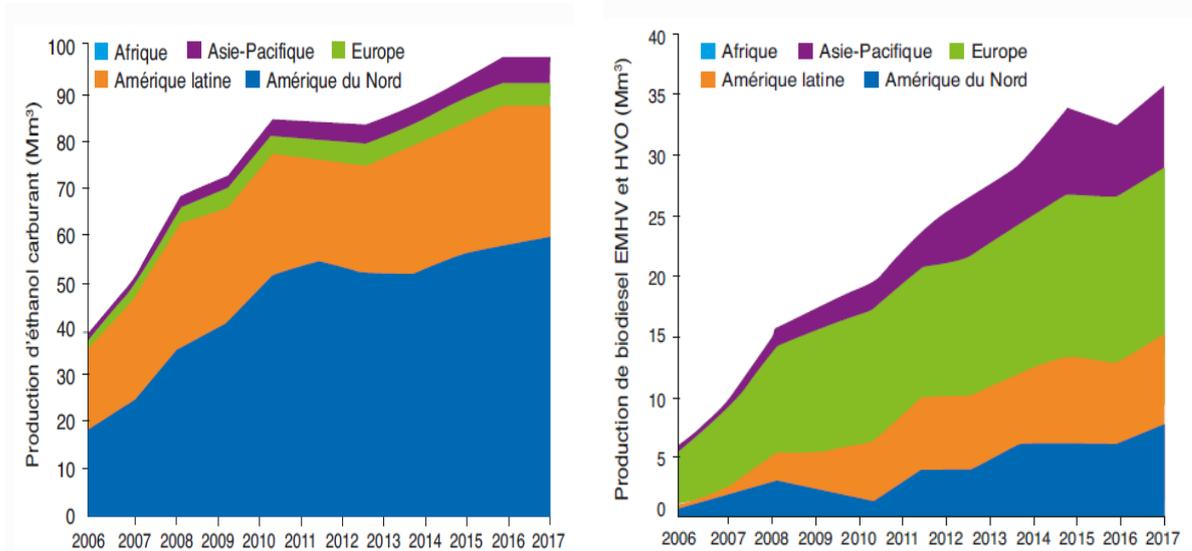


Figure 1: Progression de la production d'éthanol carburant et de biodiesel (EMHV et HVO) par zone

### I.3. Situation à Madagascar

A Madagascar, le secteur agrocarburant est le plus exploité. Depuis 2005, un développement rapide de ce secteur a été favorisé par la venue des investisseurs étrangers.

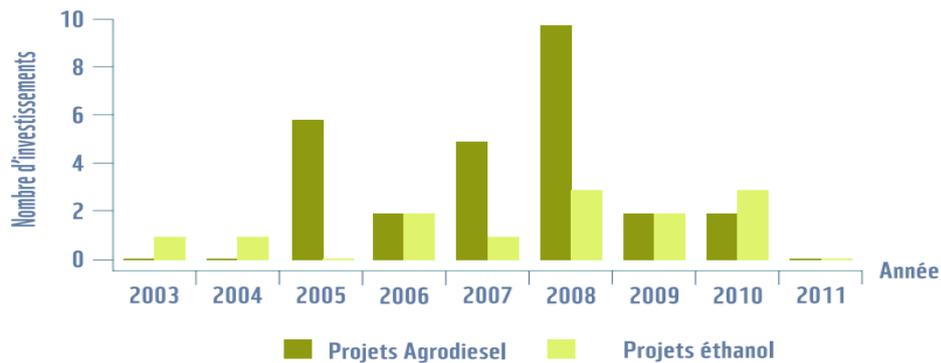


Figure 2 : Evolution du nombre de projets d'agrocarburant à Madagascar depuis 2003

Le biodiesel est la filière la plus exploitée produit à partir des plantations comme le jatropha, le coton, le soja et le palmier à huile. Le secteur est dominé par le jatropha puisque c'est une plante qui se développe naturellement dans plusieurs régions.

Des projets sur la production du bioéthanol à partir de la canne à sucre sont aussi en cours.

La fabrication d'une unité de fabrication d'éthanol a été lancée début juin 2006 à Tamatave.

### I.4. Les différents types de biocarburants

Aujourd'hui, il existe deux grandes filières de production des biocarburants courantes :

- **la filière bioéthanol** qui comprend l'éthanol et l'ETBE (Éthyl Tertio Butyl Éther) pour les véhicules essence
- et **la filière des huiles végétales** avec l'EMHV (esters Méthyliques d'huiles Végétales) pour les véhicules diesel.

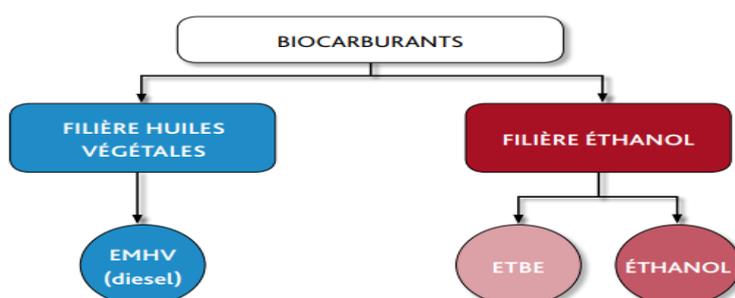


Figure 3 : Les deux grandes filières de production des biocarburants

Les biocarburants sont issus des biomasses. On distingue trois principaux types de biomasses, ainsi on peut procéder de différentes manières de valorisation :

- **La biomasse lignocellulosique**(cellulose et lignine), qui est constituée par : le bois et les résidus verts ; la paille ; la bagasse de canne à sucre ; le fourrage. La valorisation se fait par des procédés par voie sèche, dits conversions thermo-chimiques.
- **La biomasse à glucide** qui est riche en substance glucidique facilement hydrolysable : les céréales ; la betterave sucrière ; la canne à sucre ; les fruits.

La valorisation se fait plutôt par fermentation et par distillation dits conversions biologiques.

- **La biomasse oléagineuse** qui est riche en lipides : Colza ; Palmier à huile, etc. Ainsi, selon la biomasse et le processus de fabrication utilisés, on peut classer les biocarburants en trois (3) générations :

- **Les biocarburants de première génération ou biocarburants conventionnels**
- **Les biocarburants de deuxième génération ou biocarburants avancés**
- **Les biocarburants de troisième génération**

#### 1.4.1. Biocarburants de première génération ou biocarburants conventionnels

Les biocarburants conventionnels sont issus de plantes habituellement cultivées à des fins alimentaires : canne à sucre, betterave, céréales, colza, maïs, tournesol, arachide, soja, etc.

Cette première génération de biocarburant repose sur l'utilisation des organes de réserve des cultures : les graines des céréales (blé, maïs) ou des oléagineux (colza, tournesol, jatropha), les racines de la betterave ou la canne à sucre, les fruits du palmier à huile.

Ils sont répartis en deux familles ou filières comme illustre la figure suivante : la filière huile et la filière alcool.

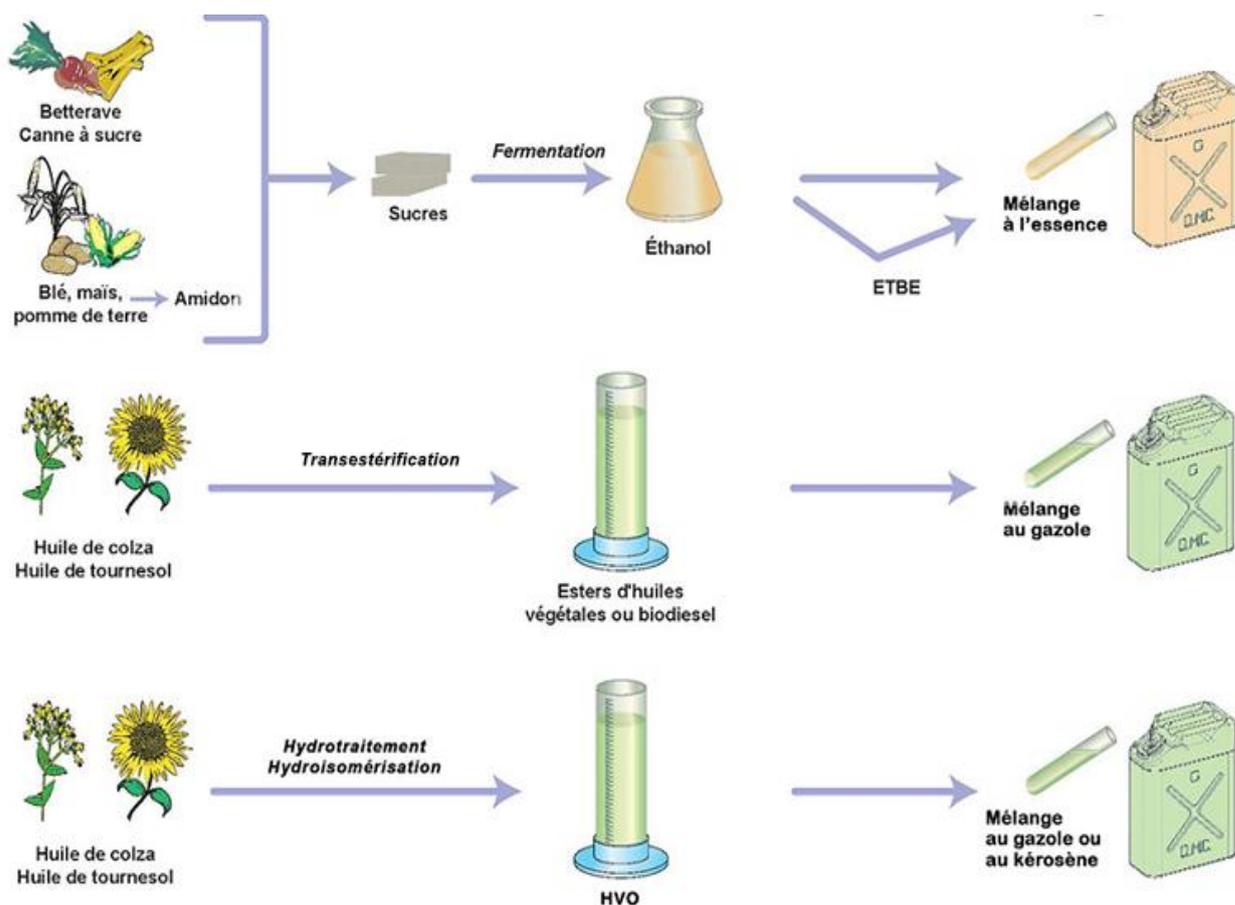


Figure 4 : Production des biocarburants de première génération

a. Le bioéthanol pour les véhicules à essence

Il s'agit d'un alcool produit par fermentation du sucre issu de plantes (betteraves, cannes à sucre) ou de l'amidon extrait de céréales (blé, maïs).

b. Le biogazole pour les véhicules Diesel

Il est fabriqué à partir de plantes contenant de l'huile (colza, tournesol, soja, palme), soumises à une transformation chimique. On fait réagir l'huile avec du méthanol ou de l'éthanol pour obtenir respectivement un EMHV (ester méthylique d'huile végétale) ou EEHV (ester éthylique d'huile végétale), composés aux propriétés voisines de celles des gazoles.

Une autre option consiste à hydrotraiter ces huiles, le produit obtenu (HVO ou *Hydrotreated Vegetable Oil*) est quant à lui directement incorporable et en toute proportion au gazole moteur.

Mais ces biocarburants conventionnels ne peuvent être produits qu'en quantité limitée, dans la mesure où ils sont issus de ressources alimentaires. De nouvelles matières premières ont donc été recherchées, aboutissant à des biocarburants avancés.

### 1.4.2. Biocarburants de deuxième génération ou biocarburants avancés

Les biocarburants avancés sont issus de la biomasse lignocellulosique, ressource non-vivrière, disponible en grande quantité et sous différentes formes.

Il y a deux filières de production possibles: la filière biochimique de production d'éthanol cellulosique et la filière thermochimique de production de carburant diesel de synthèse BtL (Biomass to Liquid).

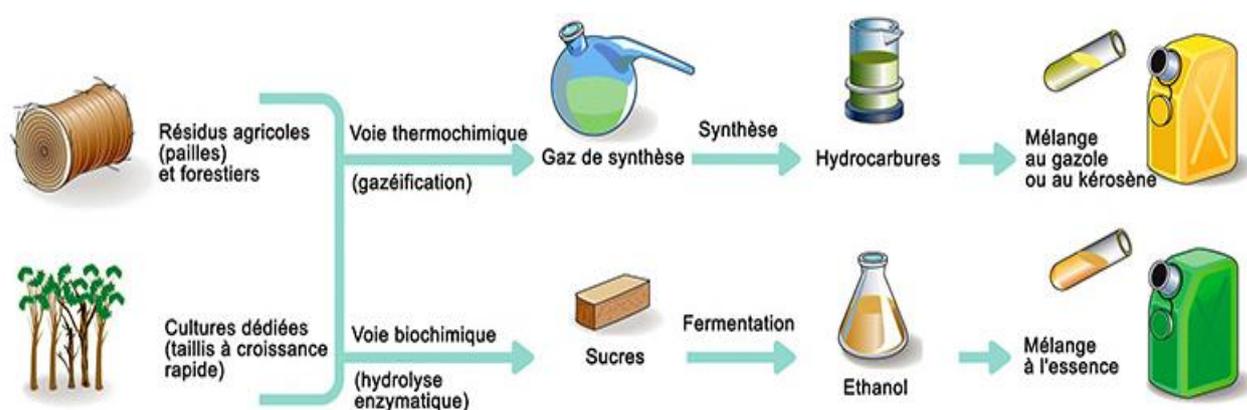


Figure 5 : Production des biocarburants de deuxième génération

#### a. Le bioéthanol de deuxième génération

Destiné aux moteurs à essence, il est produit par des procédés biochimiques. Comme dans la filière conventionnelle, il s'agit de produire de l'éthanol par fermentation de sucres. Mais cette fois, la source végétale ne fournit pas directement un sucre exploitable. La ressource lignocellulosique impose des étapes de transformation supplémentaires que pour la filière conventionnelle.

#### b. Le biogazole et le biokérosène avancés

La technologie BtL (*Biomass to Liquids*), ou voie thermochimique, permet de produire du biogazole et du biokérosène, ce dernier étant une alternative au *jet fuel* pour le secteur de l'aviation.

La biomasse est d'abord préparée pour devenir une matière homogène grâce à des techniques de pyrolyse ou de torréfaction.

Une gazéification est ensuite menée à plus de 1 000 °C en présence de vapeur d'eau ou d'oxygène. On obtient alors un gaz de synthèse constitué de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H<sub>2</sub>).

Le gaz de synthèse est purifié : des composés comme le soufre, les métaux ou le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sont supprimés.

Une fois les composés indésirables éliminés, on peut procéder à la synthèse Fischer-Tropsch, une réaction qui transforme le gaz de synthèse épuré en gazole et kérosène de synthèse grâce à des catalyseurs.

### 1.4.3. Biocarburants de troisième génération

Les biocarburants à partir de microalgues appelé "Algocarburant" est souvent présenté comme le biocarburant de troisième génération.

La production de ces biocarburants passe par quatre étapes :

- sélection des micro-algues pour leur richesse en huile,
- culture dans de grands bassins de plein air ou dans des photobioréacteurs (tubes transparents),
- récolte et extraction de l'huile selon différentes méthodes (centrifugation, traitement au solvant, lyse thermique, etc.),
- conversion de l'huile en biocarburant. Il existe deux méthodes :
  - **l'hydrogénation catalytique** qui fait réagir l'huile en présence d'hydrogène, suivie d'un hydrocraquage, produit des hydrocarbures qui peuvent être incorporés en quantité importante au gazole ou au kérosène
  - **La transestérification**, qui fait réagir l'huile algale avec du méthanol ou de l'éthanol, produit un ester d'huile algale ou biodiesel. Il peut être mélangé au gazole en proportion limitée à une dizaine de pourcents volume.

Cela est illustré par la figure ci-dessous.

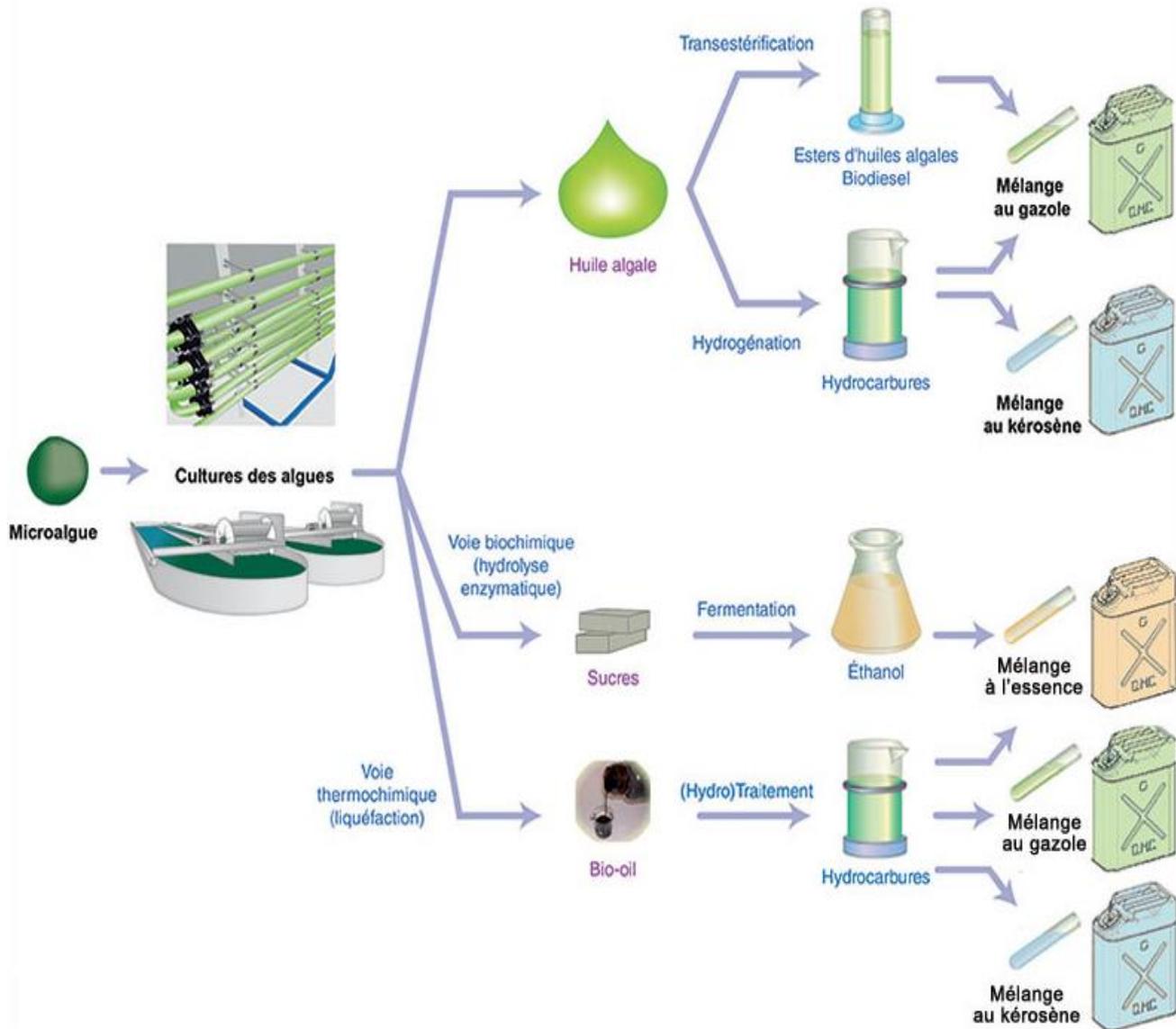


Figure 6 : Production des biocarburants de troisième génération

La biomasse participe à la lutte contre le réchauffement climatique de la planète, dans la mesure où le CO<sub>2</sub> dégagé par la combustion des bioénergies est compensée par le CO<sub>2</sub> absorbé par les végétaux lors de leur croissance.

Les biocarburants offrent une alternative aux carburants classiques. Cependant, les biocarburants de première génération soulèvent de nombreux problèmes environnementaux, économiques et éthiques puisque les terres sont cultivées pour produire du carburant plutôt que de la nourriture.

Les scientifiques privilégient à présent les biocarburants de deuxième et troisième génération qui n'utilisent pas de ressources alimentaires.

Ainsi cette présente étude est classée dans la deuxième génération car la biomasse utilisée n'a pas de concurrence avec l'alimentation humaine. Nous allons

alors élaborer du bioéthanol de deuxième génération ne nécessitant pas des étapes complexes de transformations préalables.

Voyons alors dans le chapitre suivant les généralités sur la matière première utilisée c'est-à-dire les fruits.

## Chapitre II : Généralités sur les fruits [2] [3] [5] [7] [10]

### [15] [16]

#### II.1. Définitions

Le terme « fruit » possède divers sens. Au sens botanique, le fruit est ce qui se développe lorsque l'ovaire de la fleur a été fécondé, et qui protège les ovules devenus des graines. L'usage courant du mot fruit s'applique aux aliments généralement doux que l'on consomme au dessert, au petit déjeuner ou en collation. Jusqu'au XVIIIe siècle, les légumes étaient également nommés «fruits», car ils faisaient partie de ce que l'on nommait les «fruits de la terre».

Les fruits qui nous intéressent sont les fruits dits "charnus" (baies, drupes à noyau ou à pépins). La plupart des fruits charnus sont comestibles et ont contribué depuis les temps les plus anciens à l'alimentation humaine.

Quelques définitions mériteraient d'être mentionner :

**Jus de fruit** : substance obtenu après pressage de fruits)

**Nectar** : boisson obtenue à partir de jus de fruits ou de purées de fruits, auxquels sont ajoutés de l'eau et éventuellement du sucre ou du miel

**Moût** : liquide sucré extrait des divers végétaux et destinés ordinairement à la fermentation alcoolique

**Vin** : avec un grand V, appellation générique pour toutes les boissons fermentées à base de fruits.

#### II.2. Les fruits à Madagascar

Madagascar est un pays privilégié en fruits grâce à ses potentialités agro-climatiques. La plupart des espèces fruitières y est cultivée tant endémiques qu'introduites. Ces dernières sont introduites au cours du XIXe siècle et constituent la majorité des espèces existant. À chaque saison correspond des fruits : fruits tropicaux, semi-tropicaux et tempérés.

Les principales espèces d'importance économique à Madagascar sont les suivantes :

- **Fruits tropicaux** : banane, litchis, mangue.
- **Fruits semi-tropicaux** : agrumes, papaye, ananas.

- **Fruits tempérés** : à pépins (pommier, poirier), à noyau (pêcher, prunier), fraisier, melon et pastèque.

Des acteurs de production fruitière, que ce soit du secteur étatique ou privé, mériteraient aussi d'être cités, à savoir :

- Quelques Centre Multiplicateur de Semences encore opérationnels (production et vente de semences & plants: Anosy Fianarantsoa, Joffreville Antsiranana, Ambovohy Mahajanga.
- Fruits tempérés : horticulteurs paysans regroupés dans les 3 bassins du Vakinankaratra, Ambano, Soanindrariny et Faratsiho.
- A signaler la Ferme AGRICO de Betampona (Antsirabe), pomiculture conduite en bio, production et vente de plants.
- La Pépinière de la Mania, production de semences et plants indexés d'agrumes, fruits tempérés et tropicaux.
- Fruits tropicaux : grandes exploitations fruitières de manguier au Nord et Nord-Ouest, agrumes dans le Sud-Est.
- Quelques pépiniéristes arboricoles individuels ou en association produisent des plants fruitiers : Green Partners Service (Fianarantsoa), Association des Producteurs de Plants de la Région d'Itasy(Miarinarivo), ONG Haingonala (Ambositra).

Ainsi la performance de Madagascar en matière de production de fruit est importante. Pourtant, la situation actuelle conduit généralement à des pertes énormes en fruits surtout des producteurs massifs comme les agriculteurs de la campagne. En effet, l'insuffisance d'infrastructures routières ou leur destruction, les méthodes de conservation non maîtrisées entraîne une quantité significative des déchets de fruits. Ces derniers s'entassent sur les décharges des capitaux.

L'initiative de valorisation de ces déchets de fruits présente des atouts tant économiques qu'environnementales.

Le choix d'avoir opté pour les déchets de fruits repose sur leurs compositions citées plus haut. Les jus de fruits présentent également un milieu nutritif idéal pour beaucoup de micro-organismes grâce à de leur teneur en sucres, acides aminés et matières minérales d'autant plus que la valeur moyenne du pH, située entre 3 et 4, ne

peut avoir une action inhibitrice sur le développement des bactéries. Ils présentent alors un moût idéal pour la production fermentaire des biocarburants à base de sucres directement fermentescibles ne nécessitant pas d'énormes prétraitements consommateurs d'énergies.

L'ananas, l'orange, la papaye ainsi que la pomme sont parmi les fruits d'importance économique de notre pays. Ils se composent principalement de glucides. Des fruits riches en jus, facilement accessible et de production assez importante mais surtout leurs déchets présents en grandes quantités nous a convaincu de les étudier et utiliser dans cette présente étude. Ces déchets en question sont des fruits pourries ou endommagés non comestibles.

### II.3. Données sur les fruits étudiés

#### II.3.1. Botanique des arbres fruités

Ces quatre fruits : l'ananas, l'orange, la papaye et la pomme sont issus des arbres fruités respectivement : Ananas, Oranger, Papayer et Pommier ; caractérisées par les données botaniques suivantes :

Tableau 1 : Données botaniques des fruits étudiés

Arbre fruitier	Ananas	Oranger	Papayer	Pommier
Règne	<i>Plantae</i>	<i>Plantae</i>	<i>Plantae</i>	<i>Plantae</i>
Nom scientifique	<i>Ananas comosus</i>	<i>Citrus sinensis</i>	<i>Carica papaya</i>	<i>Malus domestica</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>	<i>Magnoliophyta</i>	<i>Magnoliophyta</i>	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Liliopsida</i>	<i>Magnoliopsida</i>	<i>Magnoliopsida</i>	<i>Magnoliopsida</i>
Ordre	<i>Bromeliales</i>	<i>Sapindales</i>	<i>Violales</i>	<i>Rosales</i>
Famille	<i>Bromeliaceae</i>	<i>Rutaceae</i>	<i>Caricaceae</i>	<i>Rosaceae</i>
Genre	<i>Ananas</i>	<i>Citrus</i>	<i>Carica</i>	<i>Malus</i>

### 11.3.2. L'ananas

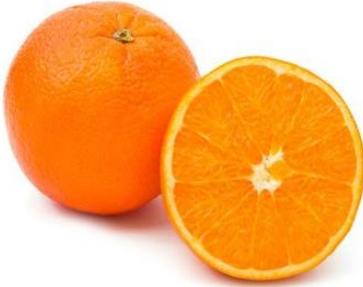


L'ananas est une plante native de l'Amérique Centrale et de l'Amérique du Sud. Elle pousse dans les régions tropicales et subtropicales. Les principales variétés d'ananas sont Cayenne lisse, Sweet (ou Del Monte Gold), Pain de sucre et Queen.

L'apport énergétique de l'ananas est en moyenne de 53,2 Kcal pour 100 g soit 225 kJ.

Photo 1 : Ananas

### 11.3.3. L'orange



Née il y a des millénaires en Asie du Sud-Est, l'orange n'acquiert sa popularité en Europe qu'au XVe siècle grâce aux grands voyages commerciaux.

Il existe 2 grandes variétés d'orange, l'orange amère et l'orange douce

L'orange apporte en moyenne 47,1 kcal pour 100 g, soit 199 kJ.

Photo 2 : Orange

### 11.3.4. La papaye



Photo 3 : Papayes

La papaye est le fruit comestible du papayer (*Carica papaya*), un arbre originaire du Mexique.

C'est un fruit tropical important. La papaye est un fruit climactérique c'est-à-dire sa maturation est dépendante de l'éthylène. Elle apporte en moyenne 43,30 kcal pour 100 g, soit 183 kJ. Le fruit pèse en moyenne 450 g, ce qui représente un apport énergétique de 195 kcal environ.

### 11.3.5. La pomme



Photo 4 : Pommes

La pomme est l'un des fruits les plus cultivés dans le monde en région tempérée.

Les pommes dégagent de l'éthylène, un gaz qui favorise la maturation des fruits. Placez quelques pommes parmi vos bananes ou avocats, ils mûriront plus rapidement.

## II.4. Composition des fruits

La composition du fruit varie d'espèce en espèce. Elle ne dépend pas seulement du degré de maturité mais aussi de facteurs comme le lieu de production, les conditions météorologiques et la nature du terrain.

En principe, les composants de fruits se répartissent en 3 groupes :

- **L'eau** : environ 80% à 85% dans les fruits frais
- **Les éléments solides insolubles dans l'eau** : comme les queues, les pelures, les enveloppes de noyaux ou de pépins, noyaux et protopectine (substance liante)
- **Les éléments solubles dans l'eau** : en part de 10 à 20 % dans le fruit ; ils peuvent être classés dans les principaux groupes suivants : hydrates de carbone, acides organiques des fruits, matières protéiques, substances phénoliques, vitamines, substances aromatiques et les matières minérales.

### 11.4.1. Les hydrates de carbone

Les hydrates de carbone également appelés glucides ou encore carbohydrates de formule générale  $C_n(H_2O)_p$ , occupent la plus grande part des substances solubles du fruit. Ce sont principalement les monosaccharides (sucres simples) comme le glucose et le fructose ainsi que le disaccharide: le saccharose. Parmi les autres hydrates de carbone se trouvant dans les fruits, il faut encore mentionner la sorbite ou le sorbitol. Les glucoses et fructoses sont directement fermentescible, les saccharoses sont fermentescible après être converti en fructose et glucose sous l'action de l'enzyme et/ou acide (procédé

d'inversion), et le sorbitol est non fermentescible mais peut dissimuler des sucres fermentescibles à une teneur élevée.

#### 11.4.2. Acides organiques des fruits

Les acides organiques présents en quantités importantes dans les fruits sont : l'acide malique, de l'acide citrique, de l'acide tartrique, de l'acide quinique et de l'acide isocitrique.

#### 11.4.3. Matières protéiques

Les protéines et leurs composants, les acides aminés, sont des combinaisons azotées. Elles sont renfermées dans les parties solubles et insolubles des ingrédients des fruits. Elles sont présentes en très petites quantités d'environ 1%.

Parmi ces matières protéiques, les enzymes, aussi appelés ferments, activent les processus chimiques dans le métabolisme des organismes vivants, sans être pour autant consommés. De ce fait, ils sont actifs même en très petite quantité.

#### 11.4.4. Substances phénoliques

Les substances phénoliques ou tanins comme les colorants végétaux.

#### 11.4.5. Vitamines

Parmi les vitamines contenues dans les fruits, la vitamine C ou l'acide ascorbique est la plus importante.

#### 11.4.6. Substances aromatiques

L'arôme des fruits se compose d'une multitude de substances différentes comme les alcools, acides volatils, esters, aldéhydes, acétals et les cétones qui ne se développent en partie qu'après complète maturation.

Cette composition des arômes est influencée par le degré de maturité, l'espèce, le climat, le milieu de culture ainsi que les conditions de stockage.

#### 11.4.7. Matières minérales

Tous les fruits contiennent des matières minérales. Ce sont : le potassium, le calcium, le magnésium, le fer, le phosphore, etc.

11.4.8. Composition nutritionnelle des fruits étudiés

La répartition des macronutriments pour 100g de chaque fruit étudié est résumée par la figure suivante.

La teneur en eau n'est pas prise en compte.

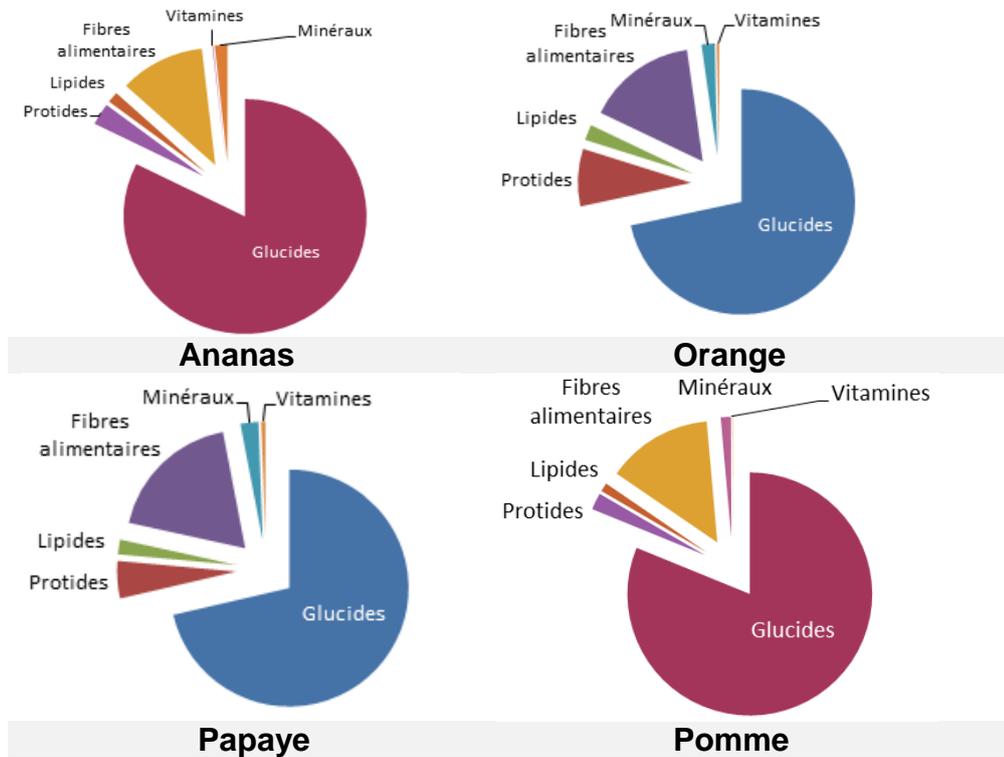


Figure 7 : Répartition des macronutriments pour 100g de chaque fruit

La valeur nutritive pour 100g de chaque fruit cru est rassemblée dans le tableau ci-après.

Tableau 2 : Composition nutritionnelle des fruits étudiés

	Ananas	Orange	Papaye	Pomme
<b>Les données de base</b>				
<b>Calories (kcal)</b>	54,3	46,4	43,3	53,2
<b>Protéines (g)</b>	0,52	1,06	0,58	0,22
<b>Glucide (g)</b>	11,3	8,04	9,9	10,7
<b>Lipides (g)</b>	0,24	0,28	0,28	0,12
<b>Vitamines</b>				
<b>Vitamine C (mg)</b>	36,4	57	61,4	4
<b>Vitamine B9 (mg)</b>	15,1	38,1	47,5	-
<b>Vitamine B3 (mg)</b>	0,35	-	-	-
<b>Minéraux</b>				
<b>Potassium (mg)</b>	142	151	190	90
<b>Calcium (mg)</b>	21,5	29,7	-	21,5
<b>Magnésium (mg)</b>	-	-	21,5	4
<b>Manganèse (mg)</b>	3,61	-	-	-
<b>Oligoélément</b>				
<b>Bêta-carotène (µg)</b>	-	71	274	0,2
<b>Fer (mg)</b>	-	0,089	-	-
<b>Sélénium (µg)</b>	-	-	-	0,15
<b>Iode (µg)</b>	1,2	-	0,8	0,2
<b>Zinc (mg)</b>	0,073	-	-	-

Nous constatons que le glucide est la composition la plus dominante dans chacun des fruits.

Les vertus qu'apportent les fruits sont d'une grande importance due par sa composition en macronutriments remarquable.

L'élaboration des produits à partir des fruits, spécialement de son jus pour des usages alimentaires est un secteur très développé dans le monde comme la vinification, la fabrication des eaux-de-vie.

Leurs déchets, les fruits trop mur, très meurtris, sans valeur commerciale, inutilisables à des fins alimentaires, constituent une source exceptionnelle de biocarburant. Ce biocarburant n'est rien d'autre que le bioéthanol. Il est produit à partir des sucres fermentescibles des fruits. Voyons dans le chapitre qui va suivre le bioéthanol : ses propriétés et son utilisation surtout comme biocarburant.

## **Chapitre III : Le bioéthanol [4] [5] [8] [9] [10] [17]**

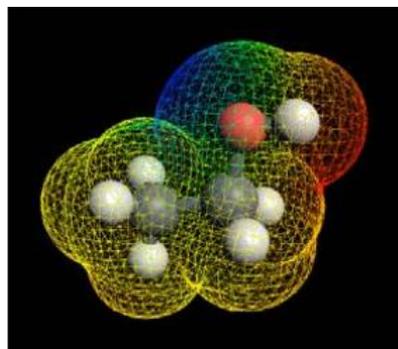
### **III.1. Définition**

Le terme bioéthanol est un amalgame entre le préfixe "bio" du grec "bios", vie, vivant et du terme éthanol. Le préfixe "bio" indique que l'éthanol est produit à partir de la biomasse (matière organique). Cet éthanol d'origine biologique n'est rien d'autre que de l'alcool éthylique. Il est destiné à la carburation automobile. C'est le biocarburant le plus consommé dans le monde, sa production est issue de la fermentation d'une matière riche en sucre.

### **III.2. Généralité sur l'éthanol ou alcool éthylique**

L'éthanol, couramment appelé « l'alcool » ou encore l'alcool éthylique sont toutes les trois des appellations qui désignent la même molécule qui est composée de deux atomes de carbone liés (C), l'un portant trois atomes d'hydrogène (H), l'autre deux atomes d'hydrogène et une fonction hydroxyle (OH).

Les formules brutes et semi-développées de la molécule d'éthanol sont respectivement le  $C_2H_6O$ , le  $C_2H_5OH$  et le  $CH_3-CH_2-OH$ . Elle est représentée par la figure ci-dessous.



*Figure 8 : Une molécule d'éthanol*

#### **III.2.1. Propriétés physico-chimiques**

L'éthanol est un liquide mobile, incolore, inflammable, volatil, d'odeur caractéristique. Il est soluble dans l'eau et dans les graisses.

Tableau 3 : Propriétés physiques de l'éthanol

Masse molaire	Point de fusion	Point d'ébullition	Densité	Densité de vapeur
46,07 g/mol	- 114 °C	78,5 °C	0,789	1,59
Tension de vapeur	Points d'éclair	Indice de réfraction	Température d'auto-inflammation	Limites d'explosivité ou d'inflammabilité (en volume % dans l'air)
5,9 kPa à 20 °C 29,3 kPa à 50 °C	13°C (Coupelle fermée)	1,3611	423 - 425 °C ; 363 °C (selon les sources)	limite inférieure : 3,3 % limite supérieure : 19 %

Dans les conditions normales, l'éthanol est un produit stable. Il possède les propriétés générales des alcools primaires (réactions d'oxydation, déshydrogénation, déshydratation et estérification).

Remarque : L'alcool pur est, pour tous les organismes, un poison violent (un cheval auquel on a introduit 30 ml d'alcool pur dans les veines étant déjà mort en 3 minutes).

### III.2.2. Synthèse

L'éthanol peut être synthétisé de deux manières différentes :

- **Synthèse chimique :**

Ce procédé développé dans les années 1970 est la production de l'éthanol grâce à la pétrochimie, en utilisant l'hydratation par catalyse acide de l'éthylène, suivant la réaction:



Il faut noter que l'éthanol de synthèse est toxique pour l'homme à cause des traces d'impuretés présentes.

- **Synthèse biologique:**

C'est la production de l'éthanol par voie fermentaire.

Cette dernière fait l'objet de notre projet et sera détaillée dans le chapitre suivant.

### III.2.3. Quelques dénominations

**Alcool absolu** : alcool éthylique presque exempt d'eau à la concentration minimum de 99.8 % vol. Utilisé dans des buts techniques et médicaux.

**Alcool brut** : doit présenter une teneur en alcool d'au moins 75 % et peut contenir plus ou moins d'impuretés dues à des produits secondaires.

**Alcool de synthèse** : élaboré à l'échelle industrielle à partir d'éthylène, un sous-produit de la transformation du pétrole. Son utilisation à des fins de consommation n'est pas permise.

**Alcool dénaturé** : éthanol dans lequel on a dissous divers produits pour le rendre impropre à la consommation.

#### III.2.4. Degré alcoolique

Le degré alcoolique, également appelé titre alcoométrique volumique, est la proportion d'alcool dans un mélange. C'est le rapport entre le volume d'alcool absolu contenu dans ce mélange et le volume de celui-ci à une température précis. Différentes unités sont utilisées pour exprimer le degré alcoolique mais les plus courantes sont citées dans le tableau suivant.

Tableau 4 : les unités de mesure du degré alcoolique

Unités	Symbole	Température de la mesure
Pourcentage volumique	%vol	20°C
Degrés	°	20°C
Degré gay-lussac	°GL	15 °C

Les instruments utilisés pour mesurer le titre alcoométrique sont les alcoomètres, les densimètres électroniques et les pycnomètres. Ces derniers sont utilisés pour déterminer les densités et par la suite d'en déduire les titres alcoométriques correspondant.

### III.3. Générations de bioéthanol

#### III.3.1. Bioéthanol de première génération

Actuellement, la production industrielle de bioéthanol de première génération est effectuée à partir de produits agricoles riches en amidon ou en saccharose qui sont facilement fermentescibles. Ces sucres servent de réserve d'énergie pour les végétaux et sont à ce titre stockés dans des tissus spécifiques à chaque plante. Deux voies sont

donc distinguées : une utilisant les plantes saccharifères et une autre basée sur les plantes amylacées. Les processus de fabrication sont illustrés par la figure 9.

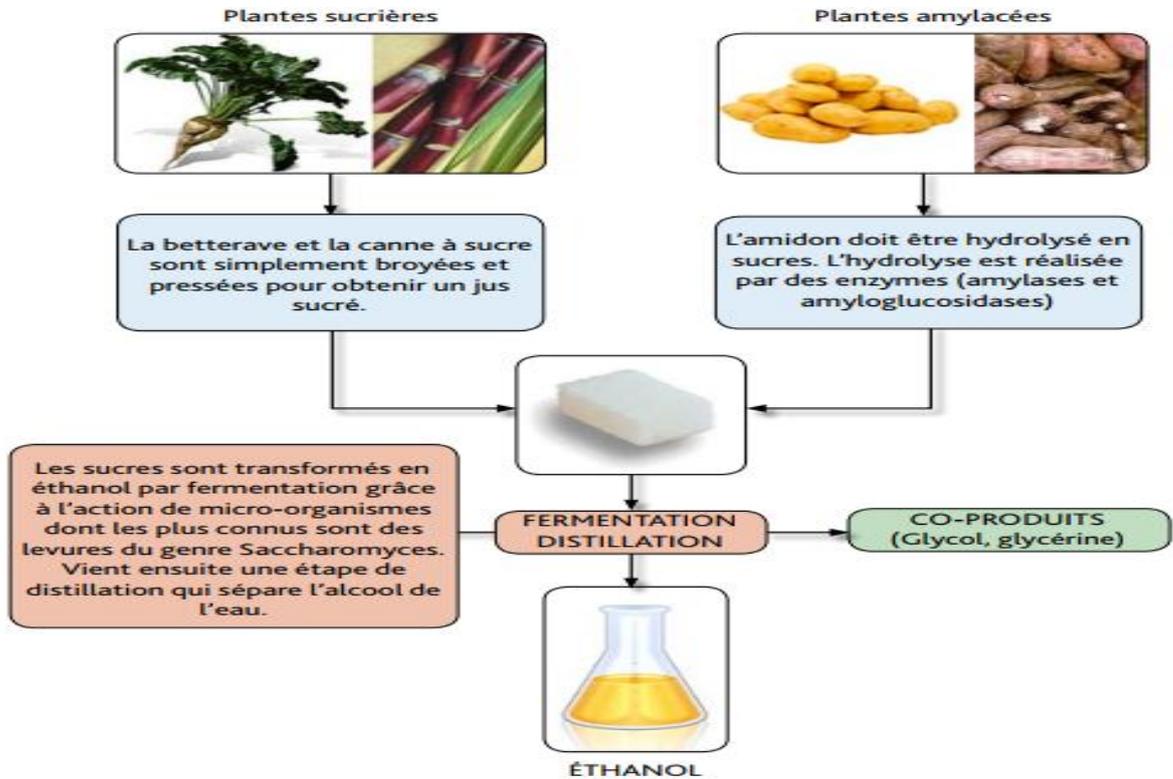


Figure 9 : production de bioéthanol de première génération

### III.3.2. Bioéthanol de deuxième génération

L'éthanol peut aussi être produit à partir de matière lignocellulosique, comme le bois, la paille, les herbacées comme illustre la figure.

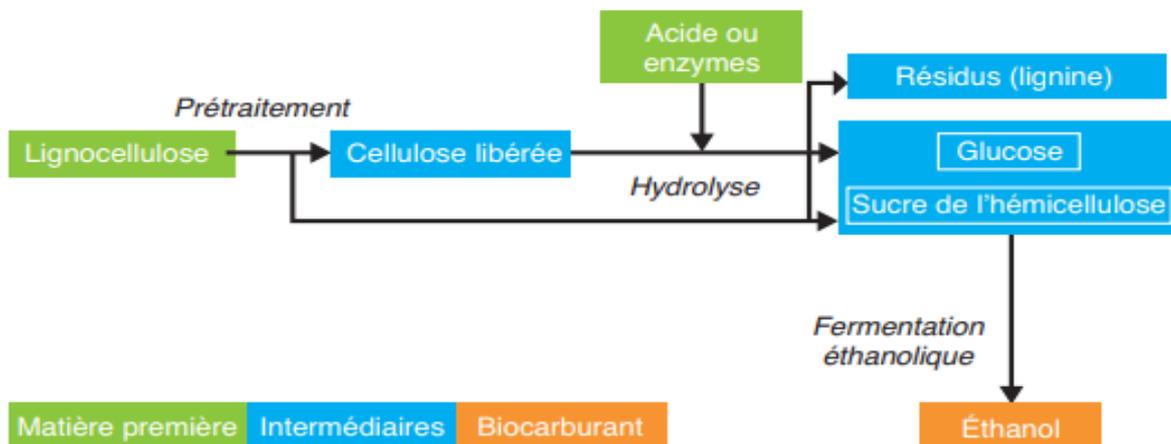


Figure 10 : Production de bioéthanol cellulosique

### III.4. Propriétés de l'éthanol par rapport à l'essence

Tableau 5 : Propriétés de l'éthanol par rapport à l'essence

Propriétés	Ethanol	Essence
Formule chimique	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
Rapport H/C	3	2,29
Masse molaire (g/mol)	46,07	102,5
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	794	735-760
Chaleur latente de vaporisation (kJ/kg)	854	289
Distillation (°C)	78,4	30-190
PCI (pouvoir calorifique inférieur) massique (kJ/kg)	26805	42690
PCI volumique (kJ/L)	21285	32020
Rapport stœchiométrique	8,95	14,4
RON (Indice d'octane recherché)	111	95
MON (Indice d'octane moteur)	92	85

Les avantages de l'éthanol sur l'essence sont les suivants :

- une bonne aptitude au mélange avec l'essence,

- un très bon indice d'octane,
- un rapport H/C plus important (pour rappel, à isoénergie, plus le rapport h/c est important, plus les émissions de CO<sub>2</sub> sont faibles),
- un impact moindre de la combustion sur l'environnement (réduction du CO<sub>2</sub> émis et des hydrocarbures consommés).

Les principaux inconvénients de l'éthanol par rapport à l'essence ont trait :

- au PCI (Pouvoir calorifique inférieur) : celui de l'éthanol est inférieur de 1/3 par rapport à celui de l'essence,
- à l'augmentation de la tension de vapeur (en mélange à l'essence entre 0 et 40 %),
- et aux risques de démixtion en présence d'eau (séparation des phases essence et alcool : séparation des phases organique et aqueuse).

### **III.5. Utilisations en tant que carburant**

L'éthanol est un composé à usages très variés allant de la chimie à l'agroalimentaire.

C'est une source d'énergie exploitée depuis des siècles, pour cuire les aliments, comme source d'éclairage ou comme combustible pour moteur. C'est ce dernier qui nous intéresse. L'éthanol peut remplacer partiellement ou totalement l'essence. Il existe plusieurs types de carburants contenant de l'éthanol dont la plupart sont des mélanges d'essence et d'éthanol à différentes proportions.

#### **III.5.1. L'éthanol utilisé directement**

L'éthanol peut être utilisé directement en tant que carburant. Il s'agit de la voie la plus directe et la plus écologique car il n'est ni transformé ni mélangé à des produits pétroliers. Cependant, son utilisation « pur » pose des difficultés :

- problème lié aux capacités de production à grande échelle,
- problème de démarrage à froid des véhicules et de lubrification.

Cela nécessite donc des adaptations des moteurs et son utilisation est réservée aux pays chauds ayant des possibilités de production importantes (Brésil, États-unis...). Néanmoins, les capacités d'un moteur utilisant l'éthanol sont bien supérieures à celles d'un moteur à essence car la puissance est augmentée à tous les régimes, la diminution de la consommation en décélération est plus efficace, l'efficacité thermique du carburant est meilleure et le couple moteur est augmenté. Ainsi, l'éthanol utilisé pur dans une base

de motorisation essence adaptée à ce type de carburant offre des performances et des gains en émissions de polluants très intéressants.

**Remarque** : l'appellation de l'éthanol dit « pur » est E100, même si en réalité il s'agit d'un mélange de 95,6 % d'éthanol et de 4,4 % d'eau.

### III.5.2. L'éthanol mélangé à l'essence

Le bioéthanol peut être incorporé à l'essence à des teneurs variant de 5 à 10 % pour les véhicules classiques (véhicules à essence construits depuis les années 1980), à des taux plus élevés (jusqu'à 85 %) pour les véhicules Flex Fuel ou FFV (Flexible Fuel Vehicles). Ces véhicules sont déjà bien implantés au Brésil par exemple. On désigne ce mélange eau-éthanol par la lettre E suivie du pourcentage d'éthanol dans le mélange: par exemple de l'E85 représente un carburant contenant 85% d'éthanol et 15% d'essence. On trouve ainsi de l'E5, E7, E10, E15, E20, E85, E95, E100 en fonction du pays dans lequel on se trouve et de l'utilisation que l'on veut en faire.

L'ajout de petites quantités d'éthanol à de l'essence présente de nombreux avantages dont notamment la réduction des rejets de monoxyde de carbone et autres polluants à la sortie des pots d'échappement des véhicules. En outre, comme l'éthanol de l'oxygène pendant leur croissance, il permet de réduire les émissions de gaz à effets de serre. L'éthanol est aussi ajouté à l'essence afin d'en améliorer l'indice d'octane.

Cependant, l'intégration d'un faible pourcentage d'éthanol dans l'essence (de 1 à 45 % environ) entraîne des difficultés de démarrage. À l'inverse, une incorporation d'éthanol supérieure à 50 % un démarrage à froid difficile, voire impossible.

Pour résoudre ces problèmes liés à l'utilisation de l'éthanol anhydre en faible mélange (E5 - E10 - E15), on transforme l'éthanol en ETBE.

### III.5.3. L'éthyl tertio butyl ether (ETBE)

C'est la forme éther de l'éthanol. La transformation se fait par réaction de l'éthanol avec l'isobutène (un produit pétrolier) d'après le procédé illustré ci-après.

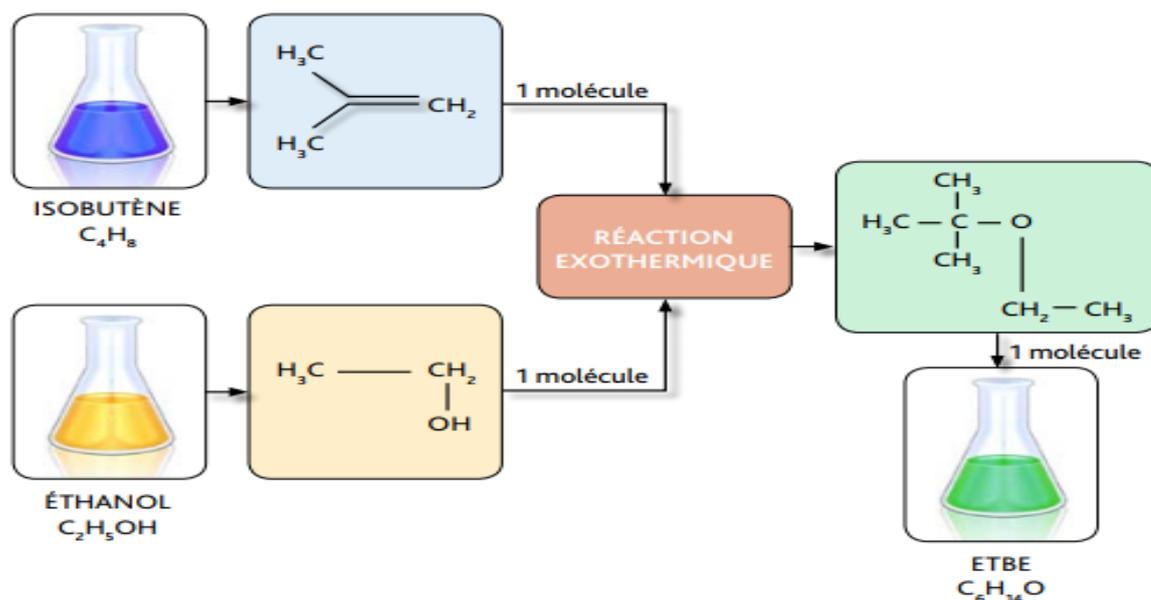


Figure 11 : Procédé de fabrication de l'ETBE

L'utilisation de carburant comprenant de l'e ne pose pas de problèmes particuliers : l'ETBE est un excellent composant des essences et présente par rapport à l'éthanol l'avantage d'une **tension de vapeur** favorable et d'une parfaite compatibilité avec les autres composants.

De plus l'ETBE a l'avantage d'avoir des propriétés énergétiques beaucoup plus proches de celles de l'essence (heptane) et d'être insensible à l'eau, ce qui supprime les problèmes de démixtion.

#### III.5.4. Additif oxygéné

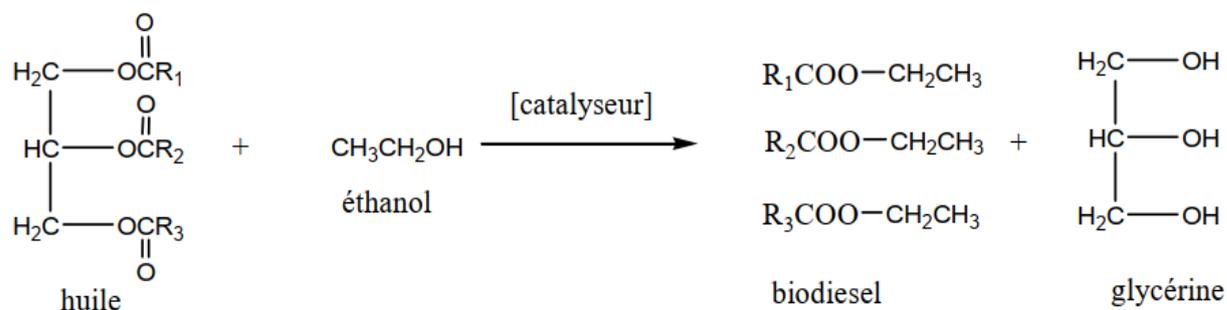
Le biocarburant E-Diesel est un mélange qui se compose de gazole entre 85 % et 95 %, et d'éthanol anhydre (0,6 % et 1 % en volume) et un package d'additifs spécialement réalisé pour la stabilité du mélange et pallier certains des inconvénients du bioéthanol comme son faible indice de cétane(8), son plus faible pouvoir lubrifiant.

. La concentration d'additif peut varier dans le mélange entre. L'avantage principal du E-diesel, est de pouvoir être utilisé dans n'importe quel véhicule équipé d'un moteur diesel sans aucune modification.

#### III.5.5. Production du biodiesel : EEHV

L'EEHV (ester éthylique d'huile végétale) est le biodiesel obtenu par une transestérification éthanolique d'huile végétale ou de graisse. Toujours dans le concept

de valorisation des déchets nous avons opté pour l'huile usagée comme matière première. Par réaction de transestérification de l'huile avec l'éthanol nous obtenons l'Ester Ethylique de l'Huile Végétal ou EEHV. Cette réaction est la suivante :



L'utilisation du bioéthanol comme carburant varie selon le Pays.

Les formulations courantes pour les moteurs à combustibles éthanoliques sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 6 : Formulations courantes pour les moteurs à combustibles éthanoliques

Carburant	Teneur en éthanol (%)
<b>Éthanol hydrique</b> (Brésil)	95,5
<b>E85</b> (Amérique du Nord)	85
<b>Essence</b> (Brésil)	24
<b>E10</b> (Amérique du Nord)	10
<b>Essence reformulée</b> (États-Unis)	5,7
<b>Biodiesel</b> (Suède)	15

## **Chapitre IV : Processus de fabrication du biocarburant [1] [5]** **[8] [9] [10] [11] [12] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24]**

Ce biocarburant n'est autre que le bioéthanol. Il peut être produit à partir de biomasse contenant des sucres, de l'amidon ou de la cellulose (l'amidon et la cellulose étant des formes plus complexes de sucres). Tous ces procédés de fabrication requièrent une étape de fermentation pour convertir le sucre en éthanol ainsi que des étapes plus ou moins complexes de distillation et de déshydratation afin de séparer l'alcool de l'eau et des autres impuretés.

Dans ce chapitre nous allons parler que du bioéthanol produit à partir de substrats riche en matières directement fermentescible en l'occurrence les déchets de fruits.

Le processus de production d'éthanol se fait en **trois** étapes principales :

- La fermentation alcoolique
- La distillation
- La déshydratation

### **IV.1. La fermentation alcoolique**

La fermentation alcoolique est connue depuis la civilisation babylonienne (3 000 ans avant JC).

#### **IV.1.1. Définition**

Etymologiquement, le terme « fermentation » vient du verbe latin « fermentare », qui signifie transformer certaines denrées alimentaires sous l'action d'un agent responsable (le ferment).

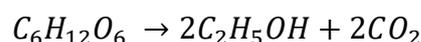
La fermentation alcoolique est une réaction biochimique qui permet la transformation des substrats carbonés en particulier les sucres, en alcool éthylique et en anhydride carbonique.

La fermentation a fait l'objet d'études par quelques hommes célèbres qui ont laissé leur nom à des rendements théoriques :

-Gay-Lussac, 511 grammes d'alcool par kg de glucose

-Pasteur, 94,7% du rendement de Gay-Lussac

En 1810, Gay-Lussac définit l'équation chimique de la réaction :



C'est une réaction catalysée et qui se produit sous l'action de levure. Afin de mieux entreprendre la fermentation, faisons un bref aperçu des agents de la fermentation ou la levure.

#### IV.1.2. Agents de la fermentation : La levure

La levure est un protiste eucaryote généralement unicellulaire appartenant au règne fongique (champignons). Il existe plusieurs sortes de levures mais celle qui nous intéresse ici est la « levure de bière » ou *Saccharomyces cerevisiae*. C'est la levure la plus ancienne et la plus utilisée.

##### a. Classification biologique de la levure

Tableau 7 : Classification biologique de la levure *Saccharomyces cerevisiae*

Règne	Végétal
Embrassement	Thallophyte
Sous-embrassement	Eumycètes
Classe	Ascomycètes
Sous-classe	Hemi-ascomycètes
Ordre	Endomycetales
Famille	Saccharomycetacea
Sous-famille	Saccharomycetaoïdae
Genre	Saccharomyces
Espèce	Saccharomyces Cerevisiae

##### b. Morphologie

Les levures sont des eucaryotes unicellulaires, ayant une forme sphérique ou ovale, largement étudiées en biologie cellulaire et moléculaire. Leur état physiologique et leur morphologie peuvent varier selon les conditions de l'environnement. Lorsqu'elles se trouvent dans des conditions favorables de culture (température, aération, pH, etc.) elles peuvent se diviser activement par bourgeonnement. La taille d'une levure peut varier entre 1 et 9 µm en longueur et de 1 à 5 µm en largeur.

##### c. Physiologie et métabolisme

La composition biochimique de *S. cerevisiae* repose essentiellement sur les protéines, les lipides, les hydrates de carbone et les acides nucléiques. Il utilise plusieurs éléments, en faibles quantités, indispensables à son

métabolisme tels que l'azote, le soufre, le phosphore, certains acides aminés, des vitamines et des oligo-éléments affectant ainsi les capacités fermentaires et la croissance de la levure.

**Tableau 8 : Composition approximative de *Saccharomyces cerevisiae* en macroéléments**

	<b>Composition cellulaire *</b>		<b>Composition cellulaire *</b>
<b>Oses</b>	180-440	<b>Lipides</b>	40-50
<b>Protéines</b>	380-590	<b>Azote</b>	30-90
<b>Cendres</b>	45-75	<b>Phosphore</b>	10-19
<b>Acides nucléiques</b>	52-95	<b>Soufre</b>	3-9

**Tableau 9 : Composition approximative de *Saccharomyces cerevisiae* en ions métalliques, besoins et limites dans le milieu**

	<b>Composition cellulaire *</b>	<b>Besoin dans le milieu (mg/l)</b>	<b>Concentration inhibitrice dans le milieu (mg/l)</b>
<b>Potassium</b>	20-21	80 - 7900	390
<b>Magnésium</b>	1,3-1,65	39 -144	24000
<b>Calcium</b>	0,6-0,75	180 -1500	1000
<b>Sodium</b>	0,12-0,3	-	-
<b>Zinc</b>	0,17-0,2	0,3 - 3	65
<b>Fer</b>	0,02-0,03	0,001- 0,8	840
<b>Manganèse</b>	0,008	0,06 - 0,12	55
<b>Cuivre</b>	0,008	0,1 - 0,6	0,6

\* : En g/kg de levure sèche

La levure se nourrit de glucose et de fructose (sucres simples). Elle a la particularité de pouvoir vivre en présence ou en absence d'air : ces deux processus énergétiques sont la respiration et la fermentation.

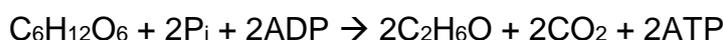
Le métabolisme oxydatif ou respiration est traduit par l'équation bilan suivant :



Glucose /fructose + Oxygène + Phosphate inorganique+ Adénosine diphosphate → Eau + dioxyde de carbone + énergie

Cette voie métabolique est très énergétique et permet aux cellules une importante multiplication.

Et le métabolisme fermentaire ou fermentation est traduit par l'équation bilan suivant :



Glucose + Phosphate inorganique+ Adénosine diphosphate → Ethanol + Dioxyde de carbone + énergie

### IV.1.3. Paramètres de la fermentation

La variation des paramètres physico-chimiques du milieu de culture influence la croissance, le mode de vie ainsi que la viabilité des levures. Ainsi, pour un bon déroulement de la fermentation, le contrôle de certains paramètres est primordial.

#### a. La composition du milieu

Généralement, le substrat est constitué par le glucose qui est utilisé comme source de carbone pour les micro-organismes. Pourtant, au-delà d'une concentration de 150g/l en glucose, les métabolismes respiratoire et fermentaire sont inhibés et influent à la fois sur la croissance cellulaire et sur la production d'éthanol. La concentration du milieu ou substrat doit être dans un intervalle de concentration bien précis pour avoir un maximum de produit et une fonction normale de la levure.

Pour que la fermentation puisse se dérouler parfaitement, en plus du sucre fermentescible, les besoins en éléments minéraux des levures, comme le montre le tableau 9 doivent être satisfaits.

#### b. L'acidité

L'acidité sert essentiellement à limiter le développement bactérien produisant des produits secondaires préjudiciables à la qualité des alcools obtenus.

Elle se mesure en gramme équivalent d'acide sulfurique par litre de milieu. Plus l'acidité augmente, plus la vitesse de croissance diminue pour devenir nulle à une concentration de 5 g/l exprimée en équivalent acide sulfurique.

Un excès d'acidité inhibe aussi l'activité des levures. Ainsi pour son développement optimal, la levure a besoin d'une acidité comprise entre 1,5 et 2,5 g/l. Une acidification adéquate du moût constitue alors un des points importants afin d'avoir une bonne fermentation alcoolique.

#### c. Le pH

Au cours de la fermentation alcoolique, les acides organiques consommés ou produits subissent des dissociations et libèrent des ions hydrogènes dans le milieu de fermentation influençant ainsi le pH. Or les levures et les moisissures sont acidophiles et leur pH optimum se situe en dessous de 5,5.

Le pH acide dont l'optimum se situe entre 3 et 6 est favorable à la croissance des levures. La fermentation alcoolique avec ces microorganismes doit alors se dérouler dans cet intervalle de pH.

d. L'agitation

L'agitation vise essentiellement l'homogénéisation du système multiphasique sur le milieu de fermentation : la phase solide constituée par les cellules microbiennes, la phase liquide qui est le milieu de culture et la phase gazeuse (gaz dissous : oxygène et dioxyde de carbone). Ainsi, elle permet d'accélérer l'activité cellulaire en évitant le phénomène de surchauffe locale.

L'agitation peut être magnétique, pneumatique ou mécanique.

e. Le dioxyde de carbone

Le CO<sub>2</sub> constitue un des produits majeurs de la fermentation. Sa quantité est proportionnelle à celle de l'éthanol formé.

Quand la pression de ce gaz est très élevée, le gaz inhibe la croissance des levures. Cependant les effets du dioxyde de carbone n'ont été relevés que pour des concentrations en CO<sub>2</sub> dissous supérieures de 15% à la saturation à pression atmosphérique. Ainsi, des pressions en CO<sub>2</sub> supérieures à 1 bar déclenchent cette inhibition.

f. L'éthanol

L'éthanol est le principal produit obtenu lors d'une fermentation alcoolique. A partir d'une certaine concentration (de 14 à 16°GL), il est toxique pour la levure et entraîne des fermentations languissantes ou même des arrêts de fermentation. L'accumulation d'éthanol dans le milieu provoque ainsi une inhibition de la fermentation qui se traduit par une augmentation en stérol et en acide gras.

La sensibilité à l'éthanol est très variable, elle dépend à la fois du potentiel génétique de la souche, du milieu de culture, de la température et du procédé de fermentation, c'est pour cela que de nombreux paramètres sont à prendre en compte.

g. La température

La température est un des facteurs clés pour la réussite d'une fermentation.

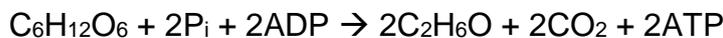
Une température très basse (au-dessous de 25°C) peut bloquer définitivement l'activité cellulaire et favoriser la production d'ester alors qu'une température supérieure à 35°C réduit à la fois l'activité métabolique, favorise l'autolyse cellulaire (destruction de cellules sous l'action de leurs propres enzymes), la prolifération des bactéries thermophiles et accroît ainsi la formation des produits secondaires (acide lactique, acide acétique, ...) avec

diminution du rendement alcoolique. La température favorable est alors entre 25°C et 33°C.

Le contrôle de tous ces paramètres est essentiel afin de maximiser le profit en obtenant un teneur en alcool élevée. L'obtention de ce dernier est la suite des réactions chimiques qui se réalisent en milieu anaérobie que nous allons détailler dans le prochain paragraphe.

#### IV.1.4. Processus biochimique de la fermentation alcoolique

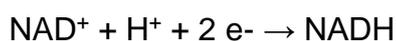
La fermentation est une réaction biochimique traduit par l'équation suivante :



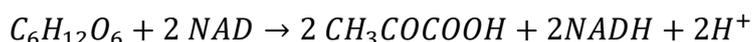
La glycolyse constitue la première étape de la fermentation alcoolique. En absence d'oxygène (anaérobiose), les levures utilisent la voie d'Embden - Meyerhof - Parnas pour l'oxydation du glucose.

Les étapes intermédiaires sont la dégradation du glucose suivie de la décarboxylation du pyruvate en acétaldéhyde et enfin la réduction en éthanol et en dioxyde de carbone.

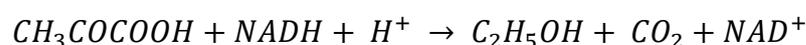
En effet, la levure comme tous les êtres vivants, contient du nicotinamide adénine dinucléotide (NAD) un coenzyme d'oxydoréduction présente dans toutes les cellules vivantes. Il est présent sous deux formes dans la cellule : forme oxydée  $NAD^+$  et forme réduite NADH.



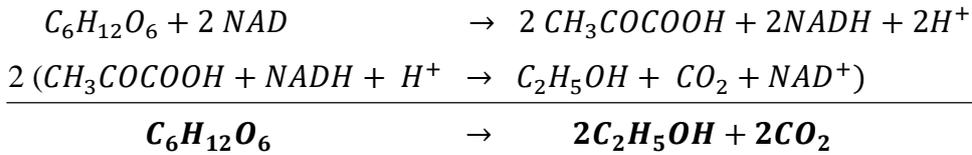
Lors d'une réaction de fermentation, ce coenzyme,  $NAD^+$ , joue le rôle d'un catalyseur. Dans un premier temps, les aldohexoses présents dans la solution sont transformés en acide pyruvique ( $CH_3CO-COOH$ ) suivant la réaction :



Dans un deuxième temps, la zymase, enzyme produite par le *Saccharomyces cerevisiae*, convertit l'acide pyruvique en éthanol, dioxyde de carbone et régénère le NAD



Ainsi l'équation globale de la réaction de fermentation est la somme des 2 équations (1) + (2) :



L'équation biochimique de la fermentation alcoolique est résumée dans la figure 12.

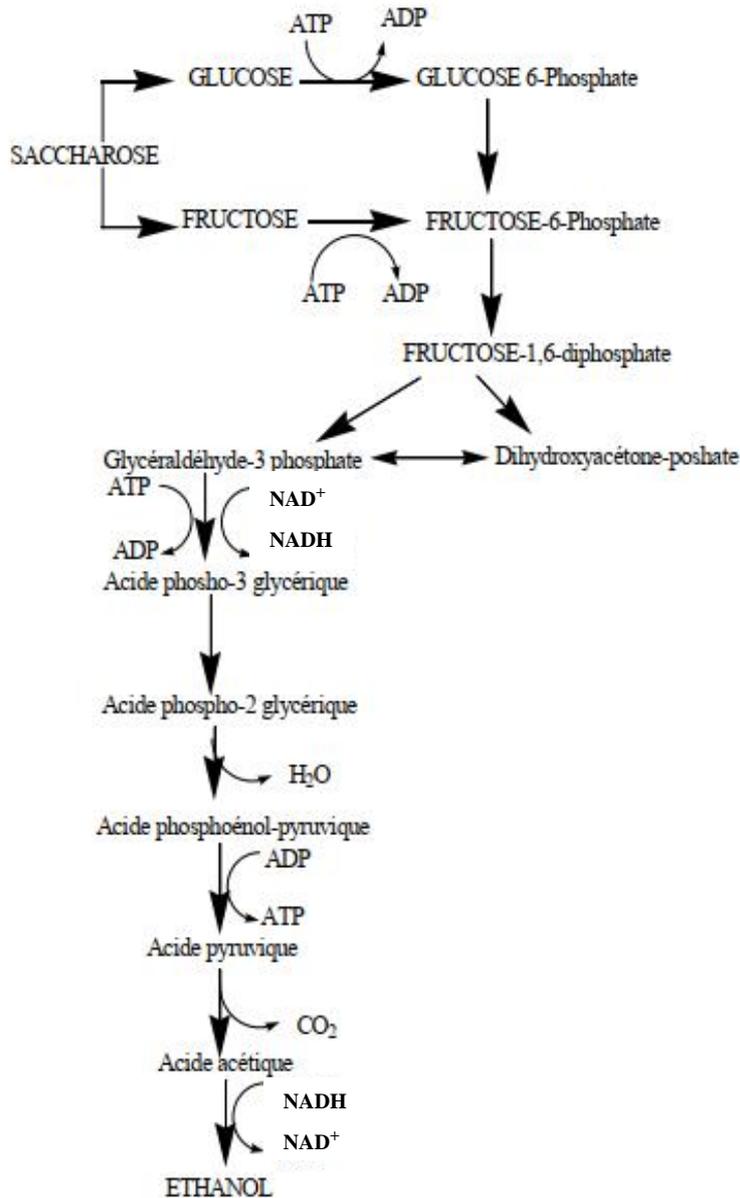


Figure 12 : Équation biochimique de la fermentation alcoolique

La réaction de fermentation de glucose libère de l'énergie thermique, alors c'est une réaction exothermique.

#### IV.1.5. Produits de la fermentation

##### a. Produit principal

L'éthanol est le produit principal de la fermentation. Il résulte de la transformation du glucose, du fructose ainsi que du saccharose. Ce dernier, avant d'être transformé en éthanol, est hydrolysé en glucose par l'enzyme invertase situé à la paroi des levures.

##### b. Produits secondaires

Plusieurs produits secondaires se sont formés pendant la fermentation. Leurs quantités dépendent des conditions opératoires de la fermentation alcoolique.

- **Gaz carbonique**

Le CO<sub>2</sub> est dû à la décarboxylation de l'acide pyruvique. La quantité de CO<sub>2</sub> produite au cours de la fermentation est presque égale à celle de l'alcool. A l'échelle industrielle, on peut récupérer ce gaz pour une autre utilisation.

- **Alcool supérieurs**

Il s'agit du propanol, du butanol, d'isopentanol, d'isobutanol et d'isopropanol. Ils sont produits en faible quantité et jouent un rôle important dans le flaveur du produit obtenu. Ces alcools supérieurs proviennent de certains acides aminés et de métabolisme du glucose

- **Glycérol**

Il est toujours présent dans la fermentation.

- **Aldéhydes**

Le plus important est l'acétaldéhyde qui représente près de 90% de tous les aldéhydes. Il est toujours présent car au cours de la fermentation, il est précurseur de l'éthanol

- **Acides et esters**

Plusieurs acides sont formés au cours de la fermentation dont les plus importants sont : l'acide acétique, l'acide lactique, les acides gras et l'acide succinique.

La présence de l'acide acétique et lactiques est dû aux bactéries et les autres acides sont liés au cycle tricarboxylique (cycle de Krebs) ;

Les esters les plus importants sont l'acétate d'éthyle et l'acétate de méthyle.

- **Levures :**

Au cours de la fermentation, les levures se multiplient.

Afin de purifier le composé obtenu après fermentation : séparer le non éthanol (eau, sucre non fermenté et autres produits de la fermentation) de l'éthanol pur, nous allons procéder à la distillation puis à la déshydratation.

## **IV.2. La distillation**

### **IV.2.1. Définition**

La distillation vient du mot latin stilla, « goutte » et de distillare (latin savant), « tomber goutte à goutte ». La distillation est un procédé de séparation d'un mélange liquide par différence de volatilité.

### **IV.2.2. Principe**

La distillation consiste à porter le mélange à ébullition et à recueillir, après une succession de vaporisations et de condensations, une fraction dite légère appelée le distillat. Celui-ci correspond au produit le plus volatil qui a le point d'ébullition le plus bas et qui distille en premier. La substance restante est appelée le résidu ou fraction lourde. La différence entre les compositions du distillat (vapeur émise) et du liquide en ébullition est le principe exploité pendant la distillation.

Le principe des différentes techniques de distillation fait appel aux lois qui régissent l'équilibre liquide - vapeur des corps purs et des mélanges.

### **IV.2.3. Techniques**

Il existe deux types de distillations :

- La distillation continue
- La distillation discontinue

#### *a. La distillation continue*

Une distillation continue est une distillation où le produit à distiller ainsi que la température ne changent pas, car le mécanisme de distillation est continuellement alimenté avec le produit à séparer.

Pour pratiquer une distillation continue, on utilise des alambics spéciaux, qui ont un mécanisme permettant d'alimenter continuellement la chaudière avec le produit à distiller. La distillation continue est beaucoup utilisée dans l'industrie, notamment pour la raffinerie du pétrole, la fabrication d'encre, de vernis ou encore de colles.

Cette distillation est uniquement utilisée dans de grandes distilleries et tourne 24H/24 et 7J/7. C'est un système très couteux et réservé aux professionnels, car une large gamme de matériel de taille colossale (10m) est nécessaire, et il faut avoir une grande quantité de jus fermenté à distiller.

b. La distillation discontinue

Une distillation discontinue est une distillation où le mélange à séparer est chargé une fois dans l'installation, et les composants de ce mélange sont distillés les uns après les autres. La composition du mélange change donc continuellement, ainsi que la température, et il est nécessaire d'emplir la cuve de temps en temps car celle-ci se vide, et de recommencer l'opération.

On distingue plusieurs types de distillation discontinue mais les plus utilisés seront évoqués ci-contre.

**b1. La distillation simple**

On parle de distillation simple lorsqu'on ne distille qu'une seule fois la substance fermentée, on chauffe donc le produit à ébullition, et on sépare ensuite le distillat qui s'égoutte en trois catégories :

- **la tête**, elle sort en premier, elle est très agressive, car elle a une forte concentration en alcool (jusqu'à 90°), on l'écarte.
- **le cœur**, c'est la partie la plus aromatisée, elle a une concentration d'environ 70°, on la garde.
- **la queue**, fade car elle ne contient pas beaucoup d'alcool, on l'écarte elle aussi.

Son montage est le suivant :

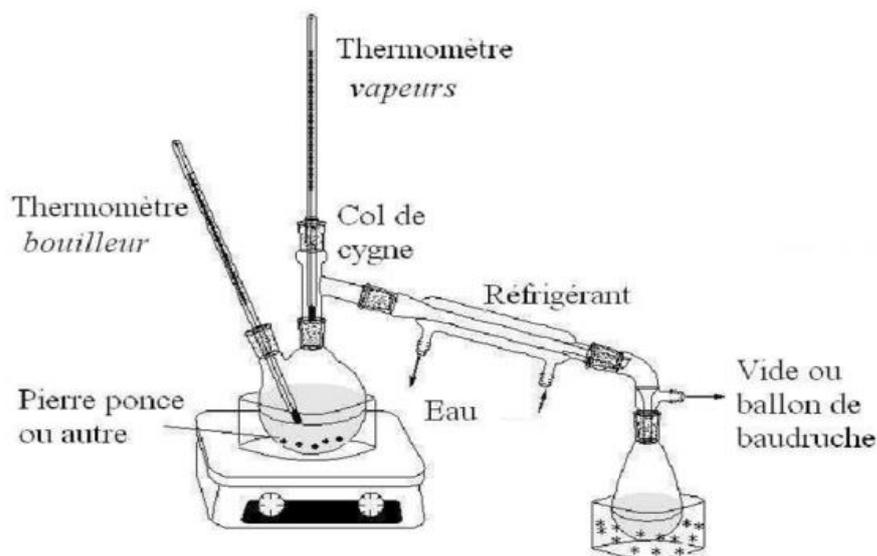


Figure 13 : Montage de la distillation simple

## **b2. La distillation fractionnée**

La distillation fractionnée, aussi appelée rectification, est un procédé de séparation par fractionnement. C'est une technique de séparation au cours de laquelle on condense la vapeur enrichie en composé volatil, puis on fait bouillir à nouveau, ce qui l'enrichit à nouveau et ainsi de suite, d'une manière continue. Son but est de séparer les différents constituants d'un mélange de liquides miscibles, en le portant à différentes températures, en changeant de récipient à chaque palier. Pour cela, elle exploite le même principe que la distillation classique mais se distingue par l'utilisation d'une colonne de séparation : la colonne vigreux, qui permet une meilleure discrimination des constituants du mélange. Cette colonne est inventée par Henri Vigreux, ayant pour vocation de séparer efficacement les différents composés en fonction de leur volatilité, même si ceux-ci ont des températures d'ébullition très proches. Son montage est le suivant :

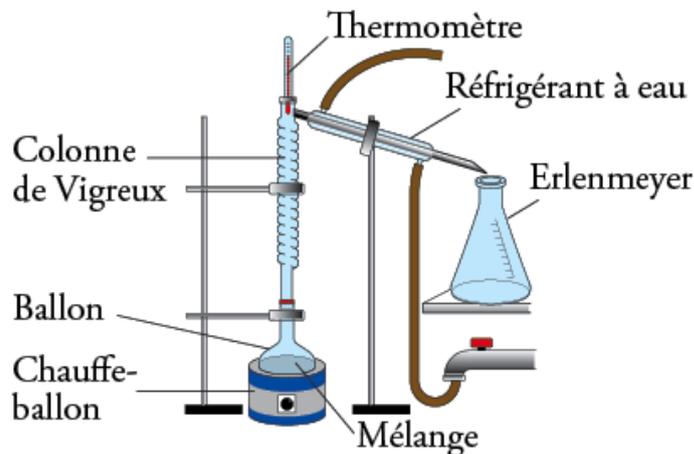


Figure 14 : Montage de la distillation fractionnée

L'alcool ainsi produit peut alors directement servir de carburant. Mais si celui-ci doit être mélangé à l'essence il est nécessaire d'ajouter une étape de déshydratation pour obtenir l'alcool anhydre. Malgré, de multiples distillations il est impossible d'obtenir un distillat constitué de plus de 96% d'éthanol car il forme avec l'eau un azéotrope, mélange liquide qui bout à température fixe en gardant une composition fixe.

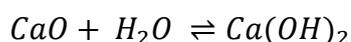
## **IV.3. La déshydratation**

Dans cette dernière étape l'éthanol est séparé de l'eau pour obtenir une teneur en eau de moins de 0,3% par unité de volume, signifiant un éthanol avec plus de 99,7% de pureté. En effet, en raison de la formation d'un azéotrope eau/éthanol, la distillation n'est plus possible. Il existe différents méthodes de déshydratation soit par

méthode purement chimique, mettant en œuvre un absorbant de l'eau-liquide ou solide comme l'avaient suggéré Guay-Lussac, Pajot-Decharme, Berthelot ; soit par une méthode physico-chimique, basée sur les propriétés des vapeurs de mélanges complexes. Nous allons citer quelques techniques les plus exploitées.

#### IV.3.1. Par voie chimique : « Méthode de Berthelot »

La méthode consiste dans un premier lieu à mélanger le déshydratant avec l'alcool et ensuite distiller le mélange final. Par exemple, on fait réagir l'alcool sur la chaux vive (CaO), la chaux absorbe l'eau et s'hydrate en hydroxyde de calcium ou chaux éteinte Ca(OH)<sub>2</sub> selon la réaction :



En distillant ensuite, on obtient de l'alcool anhydre.

#### IV.3.2. Par distillation azéotropique

La distillation azéotropique est utilisée lorsque les composés à séparer forment un mélange azéotropique de deux corps, dont les phases liquide et vapeur ont la même composition. Cependant, l'addition d'un autre produit chimique peut rendre la séparation possible en modifiant l'azéotrope. Ce dernier doit être suffisamment volatile pour être retiré du produit. Une des méthodes la plus efficace est l'utilisation du benzène comme entraîneur de l'eau. Dans le cas du benzène, on en ajoute dix fois la quantité d'eau du mélange. Une première distillation fractionnée à 64,8°C élimine l'eau, une 2ème distillation du mélange binaire restant (alcool benzène) à 68,2°C élimine le benzène et permet de récupérer l'alcool absolu au bas de la colonne.

Cependant, ce produit est très dangereux, on recourt actuellement à d'autres solvants comme du trichloréthylène ou de l'acétate d'éthyle. Les caractéristiques du mélange ternaire eau alcool-acétate d'éthyle sont résumées dans le tableau suivant.

**Tableau 10 : Compositions du mélange ternaire eau alcool-acétate d'éthyle**

Mélange	T <sub>éb</sub> de chaque constituant (°C)	T <sub>éb</sub> du mélange ternaire (°C)	Proportion volumique du mélange (%)
Ethanol	78,5	} 70,2	<b>8,4</b>
Acétate d'éthyle	77,1		<b>82,6</b>
Eau	100		<b>9</b>

Cette méthode de distillation appliquée au mélange alcoolique éthanol-eau permet d'obtenir l'éthanol absolu à degré alcoolique de 99,8°.

#### *IV.3.3. Par extraction à contre-courant*

Elle est utilisée en utilisant un troisième composant (glycérine, éthylène glycol...). Dans une colonne, la vapeur d'alcool rectifié monte à la rencontre d'un courant contenant l'agent déshydratant retenant l'eau. L'alcool absolu est récupéré en haut de la colonne.

#### *IV.3.4. Par filtrage : la pervaporation*

L'éthanol est passé à travers un filtre moléculaire qui retient l'eau. Une fois que la solution a dépassé les 96 % de concentration, la distillation se poursuit. Le filtre est chauffé pour en éliminer l'eau, puis est réutilisé.

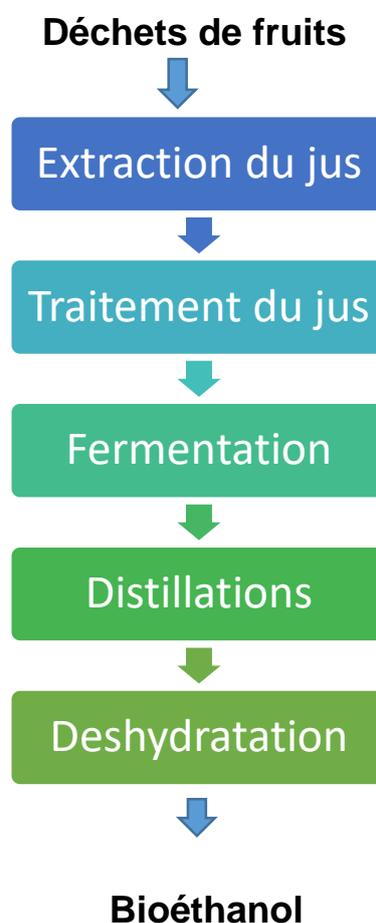
**DEUXIÈME PARTIE :**  
**ÉTUDE**  
**EXPÉRIMENTALE**

La recherche d'alternative à l'énergie fossile demeure le principal objectif de ce travail.

Dans cette partie, nous allons donc produire par voie fermentaire du biocarburant à partir des déchets de fruits, plus précisément du bioéthanol.

Nous avons opté pour des techniques simples avec des matériels de laboratoires courant ainsi que des matériels fabriqués afin d'amoindrir les dépenses.

Les grandes étapes de la synthèse du bioéthanol sont représentées par la figure suivante :



*Figure 15 : Procédé de fabrication du bioéthanol*

## Chapitre V : Traitements préliminaires

On effectue des traitements préliminaires pour le jus des fruits en vue de la fermentation. Cette étape est cruciale pour obtenir de bons résultats.

### V.1. Extraction du jus

#### V.1.1. Matériels utilisés

Balance, Couteau, Mixeur, Tamis, éprouvette graduée.

#### V.1.2. Mode opératoire

- ✓ Nettoyer et peser les fruits
- ✓ éplucher, enlever leurs pépins
- ✓ Couper en petits morceaux, Broyer et les mixer
- ✓ filtrer à l'aide d'un tamis.
- ✓ récupérer et mesurer la quantité du jus obtenus.

#### V.1.3. Résultat et interprétation

Nous avons effectué cette expérience avec 10Kg de chaque type de fruit.

Tableau 11 : Rendement du jus obtenu

	Ananas	Orange	Papaye	Pomme
<b>Masse du fruit (kg)</b>	10	10	10	10
<b>Volume du jus obtenu (l)</b>	7	5,5	6,5	4
<b>Rendement</b>	0,7	0,55	0,65	0,4

L'ananas et la papaye sont les plus rentables en matière de jus. Ce rendement dépend de l'état général des fruits ainsi que son degré de maturité. Ces fruits existent en grande quantité sur le marché lors de la réalisation.

La suite de cette expérience sera effectuée avec le mélange de ces jus obtenus afin de faciliter les manipulations (soit 23l).

Le rendement global d'extraction du jus est de :  $\eta = \frac{23l \times 100}{40l}$

$$\eta = 57,5 \%$$

## V.2. Analyse des paramètres de la fermentation

La fermentation est l'étape la plus délicate dans cette réalisation. En effet, non seulement elle est très vulnérable aux infections microbiennes mais aussi plusieurs paramètres affectent son bon déroulement. Ainsi, afin de mener à bien notre fermentation, nous avons réalisé quelques analyses de certains paramètres pouvant l'affecter comme l'acidité du moût, le pH et le taux de sucre. Mais avant tout, nous avons stérilisé le jus.

Afin de faciliter l'étude, nous avons décidé de mélanger les jus de fruits obtenus après extractions.

### V.2.1. Stérilisation du jus

Nous avons porté à ébullition pendant 15mn sur un bain marie pour éviter les risques de contamination du moût ainsi que le danger d'une mauvaise fermentation.



Photo 5 : Stérilisation du jus

### V.2.2. Modes opératoires pour chaque facteur

- **Taux de sucre** : dosage par le Liqueur de Fehling, dosage en retour par le diiode (en annexe)
- **pH** : utilisation du papier pH
- **Acidité du moût** : dosage par le NaOH

### 1.2.3. Résultats et Interprétation

Les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

Tableau 12 : Paramètres de fermentation analysés

<b>Taux de sucre (g/l)</b>	163
<b>pH</b>	4
<b>Acidité totale (mol/l) équivalent de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	0,245

Le tableau ci-dessus nous montre que le mélange de jus est un moût adéquat au développement de la levure de bière qu'on utilisera au cours de cette réalisation. La composition du jus de fruits satisfait également aux besoins nutritifs de la levure. Ainsi, aucune modification des paramètres n'a été faite avant la fermentatio

## Chapitre VI : Fermentation alcoolique

La fermentation est l'étape clé pour la production d'éthanol.

Trois fermenteurs de volumes différents ont été utilisés au cours de l'expérience.

### VI.1. Matériels utilisés

- ✓ Fermenteurs : cuve en plastique de volumes 20L, 5L et 1L notés respectivement F1, F2 et F3 ayant chacun un robinet dans la partie inférieure pour les prélèvements et un tuyau fixé sur le couvercle relié à un barboteur pour suivre le dégagement de CO<sub>2</sub>.
- ✓ Barboteur : Solution de chaux dans un bécher
- ✓ Ampoules et bain marie : pour régulariser la température
- ✓ Thermomètre



Photo 6 : Les fermenteurs F1, F2, F3

### VI.2. Mode opératoire

- **Mise en fermenteur**

Verser le jus dans les fermenteurs

- **Ajout de levure**

La levure utilisée est la levure boulangère ou *Sacharomyces cerevisiae*.

La réhydratation de la levure à raison de 5g/l de jus pendant 15 minutes est nécessaire pour qu'elle soit vivante et active.

Nous avons ajouté 4g/l de levure pour chaque fermenteur

- **Chaptalisation** : Ajout de sucre

Nous avons reparti l'apport du sucre en 3 étapes, en quantité égale :

- Avant l'ajout de la levure, nous avons appliqué le premier apport et agité le mélange jusqu'à dissolution complète ;

L'apport de sucre suivant se fait après 48 heures où la fermentation ralentit : soutirer une quantité de mout, y dissoudre le sucre ajouté et réintroduire le sirop obtenu au reste du moût ;

- On procède le troisième apport comme pour le second quand la fermentation ralentit à nouveau.

Il faut ajouter 16g de sucre pour augmenter le titre alcoolique de 1 °.

La détermination de la quantité de sucre à ajouter pour l'obtention du titre alcoolique souhaitée sera détaillée en annexe.

- **Sortie du gaz**

L'orifice est bouché avec un barboteur dans le but d'effectuer une réaction en absence d'oxygène.

La température doit rester la plus stable possible, d'où l'utilisation d'ampoules et de bain marie.

Si les conditions sont réunies, la fermentation démarre assez vite (quelques heures).

### **VI.3. Suivi de la fermentation**

Des prélèvements de la densité du moût ont été faits pour chaque fermenteur tous les 2 jours afin de connaître la fin de la fermentation.

Les matériels utilisés sont : un pycnomètre et une balance analytique

La mode opératoire est décrite comme suit :

- Tarer le pycnomètre ; soit  $m$  la masse de celui-ci.
- Remplir le pycnomètre d'eau distillée ; soit  $m'$  la masse de ce dernier.
- Remplir le pycnomètre du mout ; soit  $m''$  sa masse.
- Calculer la densité de ce dernier, par la formule :

$$\frac{m'' - m}{m' - m}$$

Pour chaque moût dans les trois fermenteurs nous avons procédé de la même manière.

Nous avons obtenu les résultats suivant

**Tableau 13 : Mesure de la densité pendant la fermentation**

Prise	0j	2j	4j	6j	8j	10j	12j
F1	1,0532	1,0523	1,0436	1,0312	1,0251	1,0143	1,0081
F2	1,0532	1,0517	1,0424	1,0299	1,0122	1,0012	
F3	1,0532	1,0510	1,0390	1,0302	1,0093		

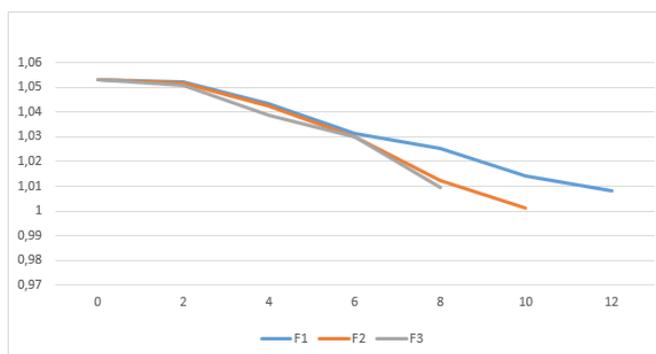


Figure 16 : Courbe densité en fonction du temps

Nous avons arrêté la prise de la densité quand l'émission de bulles dans le barboteur a cessé, cela marque la fin de la réaction de fermentation.

### VI.4. Mesure du taux d'alcool

Afin de comparer les résultats et amoindrir les marges d'erreurs, deux méthodes a été entreprises.

#### VI.4.1. Méthode 1 : Utilisation d'un alcoomètre

##### Mode opératoire

- Distiller un volume de 200 ml de moût.
- Ramener le distillat obtenu au volume initial c'est-à-dire à 200 ml.
- A l'aide de l'alcoomètre lire le degré alcoolique.



Photo 7 : Lecture du degré d'alcool avec un alcoomètre

#### VI.4.2. Méthode 2 : Utilisation de la table hydroalcoolique

- Distiller un volume de 200 ml de moût.
- Tarer le pycnomètre de 25ml ; soit  $m_0$  la masse de celui-ci.
- Remplir le pycnomètre d'eau distillée ; soit  $m_1$  la masse de ce dernier.
- Ramener le distillat obtenue au volume initial.

- Remplir le pycnomètre du distillat ; soit  $m_2$  sa masse.
- Calculer la densité de ce dernier et la comparer avec la table hydroalcoolique.

La formule pour le calcul de la densité est la suivante :

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

NB : l'appareil de distillation utilisé sera décrit dans le chapitre suivant.

### VI.4.3. Résultats et interprétation

Les résultats après les mesures de taux d'alcool sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 14 : Degré alcoolique à la fin de la fermentation

<b>Moût de chaque fermenteur</b>	<b>Par l'alcoomètre (°)</b>	<b>Diagramme hydroalcoolique (°)</b>
<b>F1</b>	>11	11,51
<b>F2</b>	>10	10,70
<b>F3</b>	>12	12,22

La deuxième méthode utilisée permet d'obtenir plus de précision.

Le fermenteur F3 est le plus performant, cela s'expliquerait par les conditions dans lesquelles la fermentation a été réalisée.

## Chapitre VII : Distillations et déshydratation

### VII.1. Distillations

#### VII.1.1. Matériels utilisés

- 1 ballon de 2L
- 1 chauffe ballon
- 1 colonne de Vigreux 700 x 20mm
- 3 Pierres ponces
- Thermomètre
- 1 refroidissement à boule
- 1 entonnoir
- 1 récipient de récupération



Photo 8 : Montage de la distillation fractionnée

#### VII.1.2. Mode opératoire

- ✓ Verser une quantité du moût fermenté à distiller dans un ballon de 2 litres avec quelques morceaux de pierre ponce
- ✓ Faire le montage comme indiqué sur la figure ci-dessus. Porter le liquide à ébullition puis diminuer le chauffage afin que la vapeur s'élève très lentement dans la colonne.
- ✓ maintenir constante la vitesse de distillation pendant toute la durée de la manipulation : il faudra donc augmenter ou diminuer le chauffage selon la température souhaitée.
- ✓ arrêter le chauffage lorsque la température indiquée par le thermomètre augmente
- ✓ mesurer le degré d'alcool obtenu par un alcoomètre

Nous avons changé trois fois le récipient de récupération afin de recueillir un distillat riche en éthanol et sans les autres composées produits lors de la fermentation.

Tableau 15 : Mode de récupération du distillat

Récipient	Température de récupération (°C)
n°1	>T
n°2	T (stable)
n°3	<T

Avec T : Température d'ébullition de l'éthanol

Le contenu du récipient n°2 uniquement sera pris en compte dans tous les résultats des distillations.

### VII.1.3. Résultats

#### a. Distillation 1

Tableau 16 : résultat de la distillation d1

Echantillon	Volume du jus fermenté (l)	Volume d'alcool obtenu (l)	Résidus (l)	Degrés alcoolique (°)
F1	14	2,60	11,32	60
F2	4,5	1,12	3,38	42
F3	0,9	0,22	0,68	51

#### b. Distillation 2

Le ballon utilisé au cours de cette manipulation étant de 2l, nous avons décidé d'ajouter l'alcool obtenu, soit :  $F1+F2+F3 = 3,94$  L puis de le diviser en 3.

Les essais notés respectivement E1 E2 et E3 seront effectués avec 3 volumes égaux de 1300 ml de degré alcoolique 54°.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau 17 : résultat de la distillation 2 d2

Essais	Volume initial (ml)	Degré d'alcool initial (°)	Volume final (ml)	Degré d'alcool final (°)	Temps de distillation
E1	1300	54	770	89	<4h
E2	1300	54	640	93	>4h
E3	1300	54	580	94	>4h

Le temps de distillation est un facteur important pour maximiser le rendement.

c. Distillation 3

Lors de cette troisième distillation, nous avons additionnée les volumes finales de chaque essai.

Essais	Volume initial (ml)	Degré d'alcool initial (°)	Volume final (ml)	Degré d'alcool final (°)
E1+E2+E3	1990	92	1602	94

**VII. 2. Déshydratation**

**Principe :** La déshydratation consiste à enlever l'eau restante du mélange alcool-eau pour obtenir un alcool anhydre, ici nous avons appliqué deux méthodes : déshydratation avec la chaux vive

La purification de l'alcool obtenu après la distillation se fait en deux manières différentes.

**VII.2.1. Déshydratation avec la chaux vive CaO**

a. Matériels utilisés

Chaux, étuve, balance analytique, appareil de distillation, bocaux en verre

b. Mode opératoire

- Activer la chaux dans l'étuve



Photo 9 : mise en étuve de la chaux et chaux activée

- Déterminer la quantité de chaux nécessaire à la déshydratation du mélange alcoolique ;
- Peser et verser la chaux dans le mélange alcoolique ;
- Bien remuer et laisser agir dans un certain temps ;
- Distiller le mélange hétérogène obtenu.

c. Résultats et interprétations

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus après déshydratation avec la chaux.

Tableau 18 : résultat de la déshydratation avec la chaux

Degré initial (°GL)	Volume initial (ml)	Quantité de la chaux	Degré final (°GL)	Volume final (ml)
94	1302	203	98	530

Cette expérience avec la chaux nous conduit à une grande perte d'alcool, d'environ 60%. Cela peut s'expliquer d'une part, par le caractère exothermique de la réaction de la chaux avec l'alcool conduisant à l'évaporation d'une partie de l'éthanol. D'autre part, la formation d'éthanolate de calcium (fixation d'une part de l'éthanol par la chaux) peut aussi être à l'origine de cette perte.

Remarque : Nous n'avons pas obtenu de l'alcool anhydre vu que la chaux vive est un agent déshydratant pas très efficace même si c'est un produit facilement accessible.

### VII.2.2. Déshydratation avec l'acétate d'éthyle

#### a. Matériels utilisés

- ✓ Acétate d'éthyle
- ✓ Distillateur
- ✓ Thermomètre

#### b. Mode opératoire

- ✓ Verser le mélange à déshydrater dans un ballon à distiller
- ✓ Ajouter la quantité d'acétate d'éthyle nécessaire à l'enlèvement de l'eau avec un peu d'excès de l'ordre de 5%.
- ✓ Faire le montage comme indiqué à la **photo 8** et suivre le mode opératoire comme à la distillation.

#### c. Résultats

Après déshydratation avec l'acétate d'éthyle nous avons obtenu les résultats suivants.

Tableau 19 : Résultat de la déshydratation par ajout d'acétate d'éthyle

Volume d'alcool initial (ml)	Degré initial (°)	Volume d'acétate d'éthyle (ml)	Volume d'alcool final (ml)	Degré final (°)
300	94	175	258	98



**Photo 10 : Ethanol obtenu**



**Photo 11 : flamme observé lors de la combustion de l'éthanol obtenu**

#### d. Interprétation

Cette manipulation nous a permis d'avoir de l'alcool titrant à 98 °. Nous constatons que le rendement est assez élevé par rapport à l'utilisation de la chaux vive. Les pertes en alcool sont dues à la partie de l'alcool entraîné par l'acétate d'éthyle. La couleur bleu à la base de la flamme est caractéristique de la combustion de l'éthanol.

## **Chapitre VIII : Analyse chromatographique en phase gazeuse**

L'analyse chromatographique est une méthode d'identification des divers constituants d'un composé à étudier.

### **VIII.1. Méthode d'analyse**

Un (1) chromatographie en phase gazeuse en standardisation interne utilisant le n-pentanol comme étalon.

### **VIII.2. Conditions opératoires**

- Colonne capillaire, FFAP (30m x 0,32mm x 0,25µm)
- Four : 45°C à 230°C (3°C/mn) –Température détecteur (FID): 260°C -Température Injecteur : 240°C
- Gaz vecteur : Azote U – Débit : 3ml/mn
- Injection : Mode split : rapport de Fuite : 1/50 – Volume injecté : 1µl

### **VIII.3. Résultat des analyses**

Constituants	Teneur en mg/l	Teneur en ml/l
Ethanol		980
Méthanol	0,00	0,00
Isopropanol	17,88	22,78
n-propanol	14,51	18,07
Iso-butanol	0,00	0,00
Iso-amylque	0,00	0,00
n-pentanol	88,00	108,06
n-hexanol	-	-
Acide acétique	-	-

## **Chapitre IX : Essai de production d'EEHV**

Toujours dans le concept de valorisation des déchets, nous avons choisi comme matière de l'huile de friture usagée et l'éthanol obtenu précédemment pour produire de l'Ester Ethylique d'Huile végétal ou EEHV.

### **IX.1 Matières premières**

- 250g d'huile usagée
- 2,5g (1% du poids de l'huile) d'hydroxyde de potassium (catalyseur)
- 72g d'éthanol



*Photo 12 : Matières premières pour la fabrication du biodiesel*

### **IX.2. Mode opératoire**

- Dissoudre le catalyseur dans l'éthanol : agiter le mélange et chauffer très légèrement.
- Ajouter la solution obtenue à l'huile et agiter vigoureusement.



*Photo 13 : mélange après agitation*

- Après 120 mn d'agitation, laisser reposer le mélange pour que la séparation s'effectue (la décantation est très longue, il faut attendre au moins une demi-journée).
- Vider le biodiesel par le dessus du récipient. Le biodiesel obtenu doit être lavé pour éliminer l'excès d'alcool et de catalyseur
- Placer le biodiesel dans une ampoule à décanter et verser lentement l'eau pour le rinçage (environ 100 ml). Cette opération est délicate, elle doit être réalisée très doucement avec le moins d'agitation possible car celle-ci provoque la formation d'une émulsion qui diminue le rendement de la synthèse.
- Laisser à nouveau décanter environ 24 heures puis récupérer le biodiesel.



Photo 14 : Séparation des phases dans une ampoule à décanter

### IX.3. Résultat et interprétation

Le biodiesel obtenu possède une densité par rapport à l'eau de  $d_{\text{biodiesel}} = 0,885$ .

La méthode d'obtention du biodiesel entreprise est relativement facile à mettre en œuvre. Cependant, l'opération de lavage est délicate, elle doit être réalisée très doucement avec le moins d'agitation possible car celle-ci provoque la formation d'une émulsion qui diminue le rendement de la synthèse.



Photo 15 : Ester Ethylique d'huile Végétal obtenu

## **Conclusion générale**

Afin de répondre aux défis énergétiques et environnementaux des transports, nous avons élaboré des carburants plus propres : les biocarburants. Ils peuvent se substituer ou compléter les énergies fossiles. C'est d'ailleurs un domaine d'étude en cours de développement au cours de dernières décennies.

Nous avons essayé de produire du bioéthanol anhydre à partir des déchets de fruits avec des techniques plus ou moins simples en passant par la fermentation ; une opération nécessitant la contrôle de certains paramètres. Ensuite, nous avons fait une série de distillations puis de déshydratation afin de purifier l'alcool. La dernière étape nous a conduites à un alcool titrant à 98° avec quelques impuretés observée lors de l'analyse CPG.

Par la suite, toujours dans le contexte de valorisation des déchets, nous avons fait un essai de production de biodiesel, plus précisément de l'ester éthylique d'huile végétal (EEHV) avec le bioéthanol obtenu et de l'huile usagé. La technique entreprise s'avère simple.

En général, les résultats obtenus dans ces travaux sont encourageants mais non satisfaisants. En effet, le bioéthanol obtenu n'est pas tout à fait anhydre et les séries de distillations entreprises consomment une grande quantité d'énergies. Pour remédier à tout cela et pour maximiser le profit, l'adoption d'autres techniques de déshydratations comme l'utilisation d'un tamis moléculaire ou d'un agent déshydratant efficace seraient plus rentables. Comme la distillation nécessite de l'énergie pour fonctionner, l'énergie solaire nous parait intéressante d'autant plus qu'il s'agit d'une énergie propre. L'utilisation d'un alambic solaire de haute performance serait alors à envisager dans la poursuite de l'étude.

## Références webographiques

- [1] IFP, [En ligne]. Available <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburants> [Accès le 2019].
- [2] VALY Agridéveloppement, Juillet 2004. [En ligne]. Available: [http://www.inter-reseaux.org/IMG/pdf\\_105\\_Filiere\\_Fruits\\_et\\_Legumes.pdf](http://www.inter-reseaux.org/IMG/pdf_105_Filiere_Fruits_et_Legumes.pdf) . [Accès le juin 2019]
- [3] CIQUAL. [En ligne]. Available: <https://ciqual.anses.fr>. [Accès le 2019].
- [4] «fiche toxicologie 48,» 2011. [En ligne]. Available: <https://www.inrs.fr/fichetox>. [Accès le juin 2019].
- [5] R. Julien, Intensification de la brique « fermentation alcoolique » de substrats betteraviers (et autres subtrats) pour la production d'éthanol, thèse université de Toulouse, 2012. . [En ligne]. Available: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002052/> [Accès mai 2019].
- [6] Institut de Coopération au Développement Economique et Social, «Les biocarburants en Afrique». [En ligne]. Available: <https://www.agrireseau.net/energie/documents/LesBiocarburantsEnAfrique.pdf> [Accès avril 2019].
- [7] WWF, «Première Phase de l'Etude Stratégique du développement du secteur Agrocarburant à Madagascar,» 2011. [En ligne]. Available : [http://awsassets.panda.org/downloads/etat\\_des\\_lieux\\_1.pdf](http://awsassets.panda.org/downloads/etat_des_lieux_1.pdf) [Accès mars 2019].
- [8] Christophe Nunes Da Silva, «La filière bioéthanol». Available : <http://data0.eklablog.net/ocan/perso/cours%20et%20tp%20en%20ligne/bioethanol.pdf> [Accès avril 2019]
- [9] «e-monsite,» juin 2019. [En ligne]. Available: <http://tpe-alcoolemie.e-monsite.com>. [accès 2019]
- [10] K. e. al., «Bio-Ethanol Production from Fruit and Vegetable,» *Bioscience Research*, vol. 15, n°13, pp. 1703-1711, 2018, [En ligne]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/328233695\\_Bio-ethanol\\_production\\_from\\_fruit\\_and\\_vegetable\\_waste\\_by\\_using\\_saccharomyces\\_cerevisiae](https://www.researchgate.net/publication/328233695_Bio-ethanol_production_from_fruit_and_vegetable_waste_by_using_saccharomyces_cerevisiae) Online ISSN: 2218-3973

## Références Bibliographiques

- [11] D. BALLERINI, Les biocarburants , Technip , ISBN : 9782710808695, 2006.
- [12] D. BALLERINI, Le plein de biocarburants? Enjeux et réalités, Tehnip , ISBN : 9782710808824, 2007.
- [13] J.P. Sawerysyn, «Carburants d'aujourd'hui et de demain : rôle des biocarburants ? » juin 2006.
- [14] É. P. e. P.-O. Pineau, «Les biocarburants : matières premières, transformation et produits,» chez *Les Notes thématiques GRIDD-HEC*, 2012
- [15] Fabrice Le Bellec , Valerie Renard, Le grand livre des fruits tropicaux, Orphie , ISBN : 9782877633772, 2007
- [16] H. Tanner, H. R. Brunner, La Distillation Moderne des Fruits : un guide pour les distillateurs, Heller , 1994
- [17] E. Duclaux, Traité microbiologie : fermentation alcoolique, ISBN : 9780215833001, 2017.
- [18] J. P. Duroudier, La distillation, ISTE , ISBN : 97817840517116, 2017
- [19] M. Hamon, F. Pellerin, M. Guernet et G. Mahuzier, Abrégé de Chimie analytique – Tome1 : Méthodes spectrales et analyse organique, p. 93 ,2<sup>e</sup> Edition, Collection des Abrégés de Pharmacie, 288p, ISBN : 2225806802, 1990.
- [20] G. Mahuzier Abrégé de Chimie analytique – Tome2 : Méthodes de séparation, p. 127, 2<sup>e</sup> Edition, Collection des Abrégés de Pharmacie, 280p. , ISBN : 2225806802, 1986.
- [21] K. M. Mehdi, Analyse du secteur de l'éthanol selon les principes du développement durable, 2008.
- [22]R. A. Johary, "Contribution à l'étude de production d'éthanol absolu en vue de son utilisation comme biocarburant", Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Génie Chimique, ESPA, 2009.
- [23] O. M. RATIANARIVO, « Préparation et utilisation de l'ester éthylique d'huile végétale de *Cocos nucifera* L. comme carburant », Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Génie Chimique, ESPA, 2009.
- [24] J. Mesplede et C. Saluzzo, 100 manipulations de chimie organique et inorganique,p. 22,Ed. Bréal, ISBN : 9782749503523, 287p, 2004.

## Annexe

### **Annexe 1 : mode opératoire pour le calcul du taux de sucre par la liqueur de Fehling.**

Le dosage décrit s'applique à des jus contenant moins de 5 g de sucres réducteurs par litre. A une concentration plus élevée, le sucre risque de caraméliser dès le début du dosage. Il faut alors diluer et tenir compte de cette dilution dans le calcul du résultat final.

- après la décoloration, introduire le jus décoloré (et dilué si nécessaire) dans la burette de Mohr ;
- prélever à l'aide d'une pipette graduée 2,5 ml de liqueur de Fehling A, les placer dans erlenmeyer de 50 ml ;
- prélever ensuite à l'aide d'une deuxième pipette 2,5 ml de liqueur de Fehling B et les verser dans l'erlenmeyer : on obtient alors une solution de cuivre cuivreux bleu foncé ;
- ajouter à l'aide d'une éprouvette graduée environ 10 ml d'eau distillée ;
- porter à frémissement le contenu de l'erlenmeyer en agitant par mouvement giratoire ;
- le jus décoloré est apporté par petits volumes (0,5 ml environ) dans l'erlenmeyer placé sous la burette de Mohr.

Le dosage doit être le plus rapide possible (car réaction réversible). On voit apparaître un précipité rouge brique. Le dosage est terminé lorsque le liquide surnageant bleu est devenu incolore (s'il devient jaune on a dépassé la dose de vin nécessaire il faut recommencer le dosage) ; le cuivre (liqueur de Fehling) a par conséquent été totalement réduit par les sucres réducteurs du vin.

- relever alors le volume de jus versé noté.

## Annexe 2 : Mode opératoire pour le calcul d'acidité totale

Mode opératoire :

- Filtrer 15 ml du jus;
- Prélever dans un Bécher 10 ml de jus filtré;
- Diluer au préalable ce jus (d'un facteur de dilution (FD) connu avec précision, on prendra FD= 5
- Ajouter 5 gouttes de solution de bleu de bromothymol. Le jus, s'il est clair, devient jaune ;
- À l'aide d'une burette graduée, laisser couler goutte à goutte une solution de NaOH 0,1 N ( $C_B$ ) en mélangeant bien après chaque goutte. (On prend comme d'incertitude une marge de 0,5% pour la burette);
- Arrêter dès que la couleur du jus a viré au bleu;
- Établir le calcul de l'acidité;

$C_A.V_A = C_B.V_B$  au point équivalent soit  $C_A=C_B.V_B /V_A$

- Multiplier  $C_A$  par le facteur de dilution (FD) pour obtenir la concentration totale d'acide :  $C_T = C_A.FD$ .

Résultat :

Comme  $C_B : 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ ,  $V_A= 50\text{ml}$ ,  $V_B=24\text{ml}$ ,  $C_A= 0,048$

→  $C_T= 0.24 \text{ mol.L}^{-1}$

## Annexe 3: Détermination de la quantité de sucre à ajouter.

Il faut ajouter 16g de sucre pour augmenter le titre alcoolique de 1°GL.

Soient S : la quantité de sucre à ajouter

V : Volume du jus, On prendra  $V=1\text{L}$

X : degrés alcoolique mesure initialement qu'on supposera nul

Y : degrés alcoolique souhaité, on posera  $Y= 12^\circ\text{GL}$

$S= V (Y-X).16$

$S=192 \text{ g par litre de jus}$

#### Annexe 4 : Pourcentage d'éthanol selon l'indice de réfraction

% éthanol	n <sup>20</sup>
0	1,3328
5	1,3360
10	1,3392
15	1,3424
20	1,3456
25	1,3489
30	1,3522
35	1,3544
40	1,3565
45	1,3581
50	1,3597
55	1,3611
60	1,3624
65	1,3635
70	1,3646
75	1,3647
80	1,3648
85	1,3653
90	1,3657
95	1,3636
100	1,3614

**Annexe 5 : Tables de proportion de densité et de titre alcoométrique du mélange eau/éthanol à 20°C publiée par l'Organisation Internationale de Métrologie Légale**

Densité	Titre alcoométrique	Densité	Titre alcoométrique
1,000	0	0,969	26
0,998	1	0,968	27
0,996	2	0,967	28
0,995	3	0,966	29
0,994	4	0,965	30
0,992	5	0,964	31
0,991	6	0,963	32
0,990	7	0,961	33
0,988	8	0,960	34
0,987	9	0,959	35
0,986	10	0,957	36
0,985	11	0,956	37
0,984	12	0,954	38
0,983	13	0,953	39
0,982	14	0,951	40
0,981	15	0,950	41
0,979	16	0,948	42
0,978	17	0,947	43
0,977	18	0,945	44
0,976	19	0,943	45
0,975	20	0,941	46
0,974	21	0,940	47
0,973	22	0,938	48
0,972	23	0,936	49
0,971	24	0,934	50
0,970	25		

# Table des matieres

<b>Remerciements.....</b>	<b>i</b>
<b>Sommaire.....</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des unités et notations .....</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des photos.....</b>	<b>vii</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>viii</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>2</b>
<b>PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>2</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les biocarburants [11] [12] [1] [13] [14] [5] [7].....</b>	<b>3</b>
I.1. Définition .....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Situation à Madagascar.....	4
I.4. Les différents types de biocarburants.....	5
I.4.1. Biocarburants de première génération ou biocarburants conventionnels .....	6
a. Le bioéthanol pour les véhicules à essence .....	7
b. Le biogazole pour les véhicules Diesel .....	7
I.4.2. Biocarburants de deuxième génération ou biocarburants avancés .....	8
a. Le bioéthanol de deuxième génération .....	8
b. Le biogazole et le biokérosène avancés .....	8
I.4.3. Biocarburants de troisième génération .....	9
<b>Chapitre II : Généralités sur les fruits [2] [3] [5] [7] [10] [15] [16].....</b>	<b>12</b>
II.1. Définitions .....	12
II.2. Les fruits à Madagascar.....	12
II.3. Données sur les fruits étudiés.....	14
II.3.1. Botanique des arbres fruités .....	14
II.3.2. L’ananas .....	15
II.3.3. L’orange.....	15
II.3.4. La papaye .....	15
II.3.5. La pomme.....	16
II.4. Composition des fruits .....	16
II.4.1. Les hydrates de carbone .....	16
II.4.2. Acides organiques des fruits .....	17
II.4.3. Matières protéique .....	17
II.4.4. Substances phénoliques.....	17
II.4.5. Vitamines .....	17
II.4.6. Substances aromatiques .....	17

II.4.7. Matières minérales .....	17
II.4.8. Composition nutritionnelle des fruits étudiés.....	18
<b>Chapitre III : Le bioéthanol [4] [5] [8] [9] [10] [17].....</b>	<b>20</b>
III.1. Définition .....	20
III.2. Généralité sur l'éthanol ou alcool éthylique.....	20
III.2.1. Propriétés physico-chimiques .....	20
III.2.2. Synthèse .....	21
III.2.3. Quelques dénominations .....	21
III.2.4. Degré alcoolique .....	22
III.3. Générations de bioéthanol .....	22
III.3.1. Bioéthanol de première génération.....	22
III.3.2. Bioéthanol de deuxième génération.....	24
III.4. Propriétés de l'éthanol par rapport à l'essence.....	24
III.5. Utilisations en tant que carburant .....	25
III.5.1. L'éthanol utilisé directement .....	25
III.5.2. L'éthanol mélangé à l'essence .....	26
III.5.3. L'éthyl tertio butyl ether (ETBE).....	26
III.5.4. Additif oxygéné .....	27
III.5.5. Production du biodiesel : EEHV.....	27
<b>Chapitre IV : Processus de fabrication du biocarburant [1] [5] [8] [9] [10] [11] [12] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] .....</b>	<b>29</b>
IV.1. La fermentation alcoolique.....	29
IV.1.1. Définition .....	29
IV.1.2. Agents de la fermentation : La levure.....	30
a. Classification biologique de la levure .....	30
b. Morphologie.....	30
c. Physiologie et métabolisme.....	30
IV.1.3. Paramètres de la fermentation.....	32
a. La composition du milieu.....	32
b. L'acidité .....	32
c. Le pH .....	32
d. L'agitation.....	33
e. Le dioxyde de carbone.....	33
f. L'éthanol.....	33
g. La température .....	33
IV.1.4. Processus biochimique de la fermentation alcoolique .....	34
IV.1.5. Produits de la fermentation.....	36
a. Produit principal .....	36
b. Produits secondaires .....	36
• Gaz carbonique .....	36
• Alcool supérieurs.....	36
• Glycérol .....	36
• Aldéhydes.....	36
• Acides et esters .....	36
• Levures : .....	36
IV.2. La distillation.....	37
IV.2.1. Définition .....	37
IV.2.2. Principe .....	37

IV.2.3. Techniques .....	37
a. La distillation continue .....	37
b. La distillation discontinue.....	38
b1. La distillation simple .....	38
b2. La distillation fractionnée .....	39
IV.3. La déshydratation .....	39
IV.3.1. Par voie chimique : « Méthode de Berthelot » .....	40
IV.3.2. Par distillation azéotropique.....	40
IV.3.3. Par extraction à contre-courant.....	41
IV.3.4. Par filtrage : la pervaporation .....	41
<b>DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....</b>	<b>2</b>
<b>Chapitre V : Traitements préliminaires .....</b>	<b>44</b>
V.1. Extraction du jus .....	44
V.1.1. Matériels utilisées .....	44
V.1.2. Mode opératoire.....	44
V.1.3. Résultat et interprétation .....	44
V.2. Analyse des paramètres de la fermentation .....	45
V.2.1. Stérilisation du jus.....	45
V.2.2. Modes opératoires pour chaque facteur .....	45
1.2.3. Résultats et Interprétation.....	45
<b>Chapitre VI : Fermentation alcoolique .....</b>	<b>47</b>
VI.1. Matériels utilisés.....	47
VI.2. Mode opératoire.....	47
VI.3. Suivi de la fermentation.....	48
VI.4. Mesure du taux d'alcool .....	49
VI.4.1. Méthode 1 : Utilisation d'un alcoomètre.....	49
Mode opératoire .....	49
VI.4.2. Méthode 2 : Utilisation de la table hydroalcoolique .....	49
VI.4.3. Résultats et interprétation.....	50
<b>Chapitre VII : Distillations et déshydratation .....</b>	<b>51</b>
VII.1. Distillations .....	51
VII.1.1. Matériels utilisés .....	51
VII.1.2. Mode opératoire .....	51
VII.1.3. Résultats.....	52
a. Distillation 1.....	52
b. Distillation2 .....	52
c. Distillation 3 .....	53
VII. 2. Déshydratation .....	53
VII.2.1. Déshydratation avec la chaux vive CaO .....	53
a. Matériels utilisés .....	53
b. Mode opératoire .....	53
c. Résultats et interprétations.....	53
VII.2.2. Déshydratation avec l'acétate d'éthyle .....	54
a. Matériels utilisés .....	54
b. Mode opératoire .....	54
c. Résultats .....	54
d. Interprétation.....	55

<b>Chapitre VIII : Analyse chromatographique en phase gazeuse .....</b>	<b>57</b>
VIII.1. Méthode d'analyse .....	57
VIII.2. Conditions opératoires .....	57
VIII.3. Résultat des analyses .....	57
<b>Chapitre IX : Essai de production d'EEHV .....</b>	<b>58</b>
IX.1 Matières premières.....	58
IX.2. Mode opératoire.....	58
IX.3. Résultat et interprétation .....	59
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>60</b>
<b>Références webographiques.....</b>	<b>a</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>b</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>c</b>
Annexe 1 : mode opératoire pour le calcul du taux de sucre par la liqueur de Fehling. ....	c
Annexe 2 : Mode opératoire pour le calcul d'acidité totale .....	d
Annexe 3: Détermination de la quantité de sucre à ajouter.....	d
Annexe 4 : Pourcentage d'éthanol selon l'indice de réfraction .....	e
Annexe 5 : Tables de proportion de densité et de titre alcoométrique du mélange eau/éthanol à 20°C publiée par l'Organisation Internationale de Métrologie Légale.....	f
<b>Table des matieres .....</b>	<b>g</b>

**Auteur** : Anjarasoa Rosina RAVOLOLONIRINA

**Titre** : « Contribution à la valorisation des déchets de fruits en biocarburants »



**Nombre de pages** : 60

**Nombre de tableaux** : 18

**Nombre de figures** : 16

**Nombre des photos** : 15

### **RESUMÉ :**

Les biocarburants sont des alternatives aux énergies fossiles pour faire face aux défis énergétiques et environnementaux actuels. Le bioéthanol et le biodiesel sont ceux en plein essor et très utilisés. Leur production à partir des déchets de fruits (biomasse) ne nécessite pas des techniques sophistiquées de transformation. Ce choix de matière première permettra de résoudre le problème de ressource et de coût rencontrés par les biocarburants dits de première génération.

**Mots-clés** : biocarburant, bioéthanol, biodiesel, fermentation, déchets de fruits, valorisation

### **ABSTRACT :**

Biofuels are alternatives to the fossil energies to face the present energetic and environmental challenges. The bioethanol and the biodiesel are those in full flight and very used. Their production from the garbage of fruits (biomass) doesn't require techniques sophisticated of transformation. This choice of raw material will permit to solve the problem of resource and cost met by biofuels said of first generation.

**Keywords:** biofuel, bioethanol, biodiesel, fermentation, fruits waste, valorization

Rapporteur : Mr Noëlon RANAIVOSAMOELINA

☎ +261342807904

✉ [naivosamy@gmail.com](mailto:naivosamy@gmail.com)

Adresse de l'auteur : lot 505/2 cité E ACMIL Bevokatra - Antsirabe 110 - Madagascar

☎ +261344207932

✉ [ravololonirinarosina@gmail.com](mailto:ravololonirinarosina@gmail.com)