

# *Conception Et Mise En Œuvre D'une Unité Pilote De Distillation Pour La Valorisation Des Déchets Fruitiers En Bioéthanol*

RANDRIAMAHEFA Notiavina R.<sup>1</sup>, RANDRIAMORASATA Ravaka<sup>2</sup>, RASOANAIVO Jean L.<sup>3</sup>, RARIVOSON Nantenaina V.<sup>4</sup>, RAVONINJATOVO Achille O.<sup>3</sup>, ANDRIAMANANTENA Ndriananja S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chercheurs, Ecole Doctorale des Sciences en Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Université d'Antananarivo, Madagascar

<sup>2</sup> Enseignants Chercheurs, Ecole Doctorale en Ingénierie Et Géosciences Université d'Antananarivo, Madagascar

<sup>3</sup> Chercheurs Enseignants, Centre National de Recherches Technologique et Industriel d'Antananarivo, Madagascar

<sup>4</sup> Enseignants Chercheurs, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Madagascar

Auteur correspondant : RANDRIAMAHEFA Notiavina Riccia. E-mail : [notirandriamahefa@gmail.com](mailto:notirandriamahefa@gmail.com)



**Abstract:** The present research focusses on bioethanol production from fruit waste in industrial way. The process is composed of juice extraction, alcoholic fermentation, continuous distillation in the aim of producing high proof ethanol. The pilot unit required the design and development of a juice extractor, 4 fermenting tanks, a continuous distillation still and a boiler fed with biomass fuel. The unit can produce up to 400 liters of ethanol at 92 to 94% by volume. The fermentation efficiency and distillation efficiency are 88,24% and 91,97% respectively. The obtained results confirm that bioethanol plant can be set up with the adopted technics, and the obtained energy can be used as an alternative for domestic fuel.

**Key words:** Fruit waste, valorization, alcoholic fermentation, continuous distillation, bioethanol

## I. INTRODUCTION

Madagascar fait face à un défi énergétique majeur : 92 % de son énergie provient du bois de chauffe, tandis que les produits pétroliers représentent environ 7 %, soit 776 573 tonnes d'équivalent pétrole (TEP) [1]. Cette situation nécessite une reconsidération urgente du mix énergétique par l'État malgache en faveur de solutions plus éco-responsables. D'une part, les ressources forestières s'amenuisent [1] ; d'autre part, la dépendance aux énergies fossiles est intenable en raison de la hausse permanente des prix et de la pollution environnementale qu'elle engendre. Pourtant, le pays dispose d'une ressource sous-exploitée : les déchets de fruits. Rien que dans la capitale, on estime que la quantité de déchets de banane se situe entre 1 200 et 6 000 tonnes par an [2]. À l'échelle mondiale, près de 57 millions de tonnes de déchets de fruits sont générées annuellement, contribuant à la pollution et aux risques sanitaires [3]

Ces déchets peuvent être valorisés de multiples façons :

- Extraction de composés bioactifs [4] ;

- Production d'agents aromatisants [5] ;
- Production d'engrais pour la fertilisation des sols [6]

Leur conversion en énergie représente une alternative prometteuse via plusieurs technologies :

- Biogaz [7][8] ;
- Briquettes et combustibles densifiés [9] ;
- Bioéthanol [3] [10].

L'objectif principal de cette étude est la mise en place d'une unité pilote de production de bioéthanol à partir de déchets de fruits. Les matériels et équipements nécessaires seront conçus, dimensionnés, réalisés puis mis en œuvre. Le processus comprendra l'extraction du jus sucré contenu dans le déchet, la fermentation alcoolique visant à transformer le sucre obtenu en éthanol, et la distillation. Le produit final sera du bioéthanol avec les exigences requises, pour son usage domestique.

## II. MATERIEL ET METHODE

### II.1. Cahier de charge

Le tableau 1 résume les paramètres essentiels du cahier de charge de l'installation. Ils concernent la production journalière, le degré alcoolique désiré, la matière première utilisée, la source d'énergie nécessaire durant l'étape de transformation, ainsi que les matériaux devant être utilisés pour la conception des différents équipements.

La finalité du projet est de produire, au minimum, 400 litres d'éthanol par jour, titrant à 90 % volumique. La matière première de base sera le sucre contenu dans les déchets de fruits.

*Tableau 1: cahier de charge de l'installation de production de bioéthanol*

Paramètre	Valeur
Production journalière	400 litres d'éthanol
Degré alcoolique du produit fini	Supérieur ou égal 90%
Matière première	Déchet des fruits (Litchi, mangue, ananas)
Energie utilisée dans le processus	Electricité pour les besoins en énergie mécanique (pompe, extracteur) Biomasse (pour la production de chaleur au niveau de la chaudière)
Matériaux	Acier inoxydable pour les équipements et partie en contact avec le produit et la matière première Acier ordinaire pour les supports et éléments d'assemblage Tuyauterie en série galvanisée Chaudière en acier ordinaire

Le Tableau 2 complète le cahier de charge avec les exigences fonctionnelles des équipements. Il résume l'ensemble des éléments et paramètres auxquels doivent répondre les équipements à concevoir.

*Tableau 2: Liste des exigences fonctionnelles des équipements*

<b>Equipement</b>	<b>Exigence fonctionnelle</b>
Extracteur de jus	<p>L'équipement doit disposer d'une trémie pour le chargement de la matière première L'extraction doit être effectuée de manière continue</p> <p>L'équipement doit disposer d'une partie permettant l'évacuation du jus et une autre partie permettant l'évacuation du tourteau</p> <p>Un système permettant le réglage de la pression doit être disponible</p>
Cuve de fermentation	<p>La capacité de la cuve doit être compatible avec la capacité de l'installation La cuve doit permettre le soutirage du moût fermenté</p> <p>La cuve doit permettre la clarification du moût après fermentation</p> <p>La cuve doit permettre l'introduction facile de la matière à fermenter</p>
Colonne de distillation	<p>La colonne de distillation doit permettre la séparation en continue de l'alcool et de l'eau</p> <p>La chaleur nécessaire doit être apportée par de la vapeur</p> <p>La colonne doit permettre l'augmentation du degré alcoolique</p> <p>Le distillat doit ressortir de la colonne à une température voisine de 30 degrés Celsius</p> <p>Le degré alcoolique du distillat peut être réglé entre 40 et 90 degrés</p> <p>La colonne doit disposer de système permettant l'ajustage du débit d'alimentation, du degré alcoolique du produit fini, du degré de refroidissement du distillat</p>
Chaudière	<p>La capacité de la chaudière doit être adaptée au besoin en chaleur de la colonne de distillation La pression de service doit être égale à 1 bar</p> <p>La chaudière doit disposer d'un foyer à biomasse</p> <p>La chaudière doit disposer d'un système permettant l'alimentation en eau pendant son fonctionnement</p> <p>La chaudière doit disposer d'un manomètre et d'une soupape de sécurité Le tirage de l'air doit être effectué naturellement</p>

## *II.2. Méthodologie*

La méthodologie adoptée pour cette étude est résumée par le diagramme de la Figure 1. La première étape consiste à définir le cahier de charge et les exigences fonctionnelles de l'installation. Ce cahier de charge permettra ensuite d'identifier les techniques et technologies adaptées, en fonction du résultat attendu. La troisième étape consiste à la conception et au dimensionnement de tous les équipements nécessaires pour l'installation. Il s'agira de concevoir la forme, la géométrie, la capacité et le calcul des différents éléments et organes composant l'équipement. L'étape suivante est consacrée à la réalisation des équipements, précédemment conçus et dimensionnés. L'ensemble des matériels sera réalisé dans l'atelier de la société ARTICOM (Antananarivo, Itaosy) qui est reconnue pour son expertise dans la construction des appareillages. La mise en œuvre des équipements et la mise au point est une étape nécessaire afin d'apprécier le fonctionnement de l'équipement, de procéder aux divers réglages. Cette étape est aussi nécessaire pour s'habituer à la conduite des équipements. L'étape finale est le test et l'expérimentation de l'installation entière. Il s'agit de faire fonctionner l'installation et de procéder aux diverses

mesures afin de déterminer sa performance.

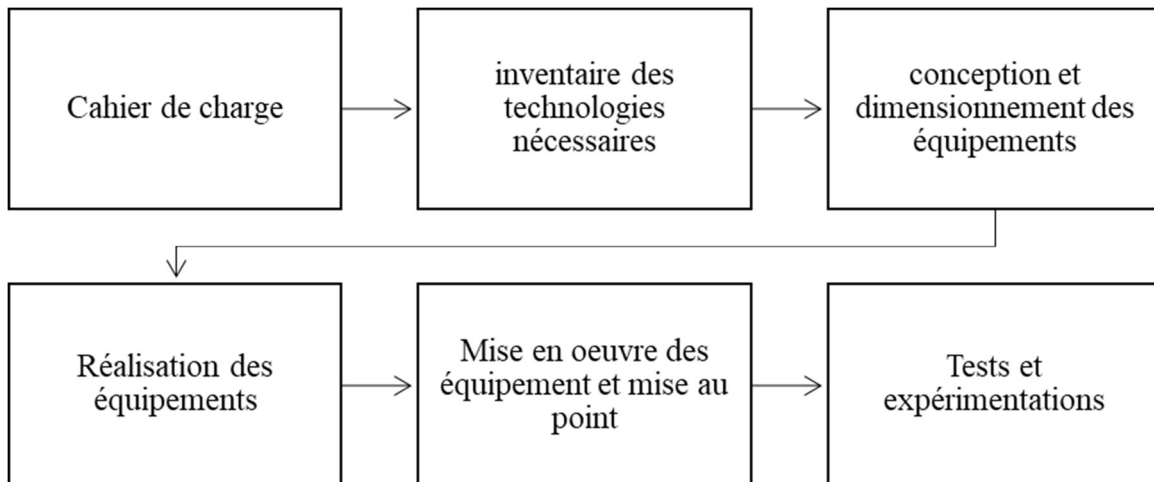


Figure 1: Méthodologie de la conception et développement de l'installation

### II.3. Conception et développement des matériels

Le Tableau 3 résume le processus de conception et dimensionnement de chaque appareillage. Il indique la méthode utilisée pour la conception, les données d'entrée nécessaire avec leur valeur et les données de sortie obtenues avec leur valeur. Généralement le dimensionnement s'est basé sur la méthode disponible dans la littérature.

Les données de sorties obtenues permettent de disposer des valeurs fonctionnelles nécessaires pour l'acquisition des matériels, ainsi que pour la réalisation. Particulièrement, la méthode de conception et dimensionnement des cuves de fermentation est la suivante :

#### II.3.1. Capacité unitaire des cuves

$$V_{\text{cuve}} = \frac{Q_{\text{Dist}} \cdot TA_{\text{Dist}}}{TA_{\text{wine}}} \quad (\text{Eq 1})$$

Où :

- $Q_{\text{Dist}}$  Débit de production éthanol par jour (400L/j)
- $TA_{\text{Dist}}$  Taux d'alcool du distillat (90% vol)
- $TA_{\text{wine}}$  Taux d'alcool du moût après fermentation (10% vol)

#### II.3.2. Nombre de cuve

Afin d'assurer une production continue, le nombre de cuve de fermentation sera égal à la durée en jour de la fermentation (4 jours). Chaque fermentation sera enclenchée successivement, afin de disposer chaque jour d'une cuve remplie de vin prêt à être distillée.

Tableau 3: Conception et dimensionnement des équipements

Matériels	Méthode de conception et dimensionnement	Donnée d'entrée	Donnée de sortie
Extracteur à jus	Méthode de calcul de (B. KatariaMahendra, 2018) [16]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de la vis (70 mm)</li> <li>• Facteur de sécurité 2,5</li> <li>• Diamètre de l'auge de la vis (120mm)</li> <li>• Diamètre de l'arbre (50mm)</li> <li>• Facteur de remplissage 0,8</li> <li>• Matériaux acier inoxydable 304</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacité de production (1345kg/h)</li> <li>• Puissance de l'arbre (10CV)</li> <li>Vitesse de rotation (90rpm)</li> </ul>
Cuve de fermentation	CF Calcul et dimensionnement de la cuve de fermentation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin journalier (400Litre/jour)</li> <li>• Degré alcoolique du vin en fin de fermentation (10%)</li> <li>• Durée de fermentation (4 jours)</li> <li>• Matériaux acier inoxydable 304</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacité de la cuve (3600 Litres)</li> <li>• Nombre de cuve (4)</li> </ul>
Colonne de distillation	McCabe-Thiele [17]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degré alcoolique du vin en fin de fermentation (10%)</li> <li>• Débit distillat (400L/j)</li> <li>• Degré Alcoolique du distillat (90%)</li> <li>• Reflux (3,94)</li> <li>• Matériaux acier inoxydable 304</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diamètre colonne (180mm)</li> <li>• Nombre de plateaux théorique (13)</li> <li>• Besoin en vapeur 56,7kg/h</li> <li>• Puissance condenseur de reflux (16,9 kW)</li> <li>• Puissance condenseur final</li> </ul>
Chaudière	(A. A. Ibrahim et al, 2018) (H. Abbas et al, 2021) [19]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pression maximale de service (3 bars)</li> <li>• Débit vapeur 60kg/h</li> <li>• Pouvoir calorifique inférieur du bois (14600 kJ/kg)</li> <li>• Type de chaudière (tube de fumée)</li> <li>• Matériau acier (S235-JR)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface d'échange active 10m<sup>2</sup></li> <li>• Diamètre virole 670mm</li> <li>• Epaisseur virole 6mm</li> <li>• Section de la chambre de gazéification 0,12 m<sup>2</sup></li> <li>• Volume de la chambre de combustion 0,112m<sup>3</sup></li> </ul>

## II.4. Matériels et équipements

### II.4.1. Extracteur de jus

L'extracteur de jus a pour fonction d'extraire le jus sucré de la pulpe du fruit. Il s'apparente à une presse à vis, composée d'une trémie de chargement, d'une vis qui presse le fruit de manière continue, d'une grille à travers laquelle s'évacue le jus et d'un système permettant le réglage de la pression d'extraction. La vis est couplée à un motoréducteur ayant une puissance de 7 CV (Chevaux). Elle tourne à une vitesse de 100 tours par minute. Le pas des auges est de 70mm et le diamètre du tambour est de 100 mm. L'ensemble est incliné à un angle de 30 degrés afin de faciliter la séparation du jus et du tourteau.

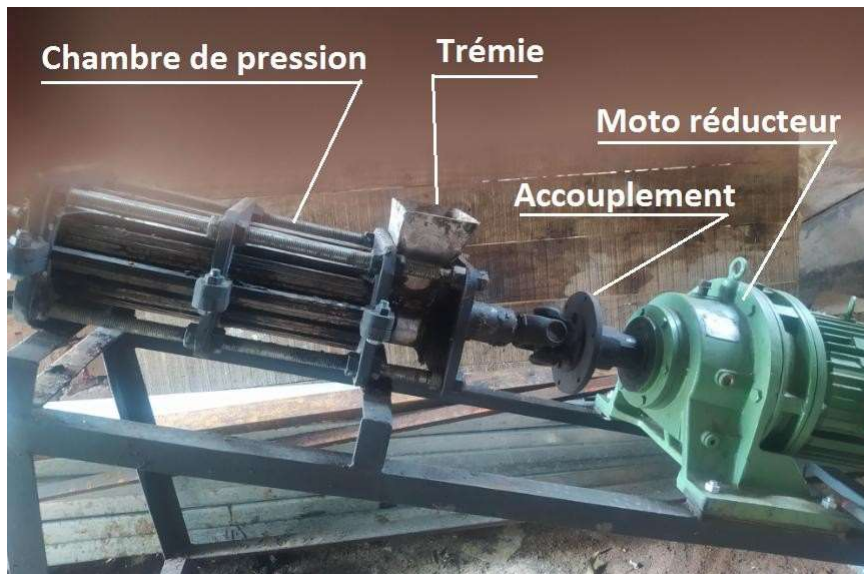


Figure 2: Photo de l'extracteur de jus

### II.4.2. Cuve de fermentation

Les cuves de fermentation sont réalisées en acier inoxydable. La capacité est de 1200 litres. Le fond des cuves est conique pour faciliter l'évacuation des précipités après clarification du moût fermenté. Les cuves sont munies de couvercle à ouverture rapide pour faciliter l'introduction des jus à fermenter. Après fermentation, le moût fermenté est soutiré grâce au raccord situé sur la paroi latérale inférieure de la cuve.



*Figure 3: Photo de la cuve de fermentation*

#### *II.4.3. Colonne de distillation en continue*

La colonne de distillation est composée des éléments suivants : rebouilleur, zone d'épuisement, zone d'enrichissement, l'alimentation, le condenseur de contrôle du reflux et le condenseur final. Les autres accessoires sont la pompe d'alimentation du moût, les tuyauteries nécessaires.

La partie électrique est composée de différents appareillages assurant la commande et la protection des équipements électriques ainsi que les thermomètres nécessaires pour la conduite de la colonne.

L'ensemble de la colonne est réalisé en acier inoxydable. Chaque section est assemblée par des brides afin de faciliter leur montage et leur inspection. La hauteur totale de la colonne est de 5m. L'intérieur est rempli de matériau de garnissage.



Figure 4: Photo de la colonne de distillation en continue

#### II.4.4. Chaudière à biomasse

La chaudière est composée d'un échangeur, d'un foyer de combustion et d'une cheminée. L'échangeur est réalisé avec des tubes de fumée, dans lesquelles circule le gaz chaud issu de la combustion en effectuant 3 passes avant de sortir par la cheminée. Les accessoires de la chaudière sont la pompe d'alimentation en eau, le manomètre, le régulateur de niveau et la

soupape de sécurité.

Le foyer de combustion fonctionne selon le principe du gazéificateur à co-courant.

Ce système est structuré en trois composants principaux :

- Une trémie : elle permet le chargement du combustible solide (tel que le bois, les déchets végétaux ou les résidus).
- Une zone de gazéification : c'est là que le combustible solide est transformé en gaz combustible (gaz de synthèse ou syngas) par un processus de gazéification.
- Une chambre de combustion : elle permet la combustion du gaz de synthèse ainsi produit pour libérer de l'énergie.



Figure 5: Phot de la chaudière et du foyer de combustion

## II.5. Matière première et intrant

### II.5.1. Déchet de fruit

La principale source de matière première est le déchet de litchi qui ne respecte pas les critères qualité (présence de moisissures, hors calibre, degré de murissement...) d'une usine de production de jus de fruit (MPE, Madagascar Premium Exotica). Après avoir retiré la peau et le noyau, on obtient la pulpe qui contient un jus sucré dont le degré brix varie entre 14 et 16°.

### *II.5.2. Autre intrant*

- La levure boulangère commerciale *Saccharomyces* est utilisée pour la fermentation alcoolique
- Le diamonium phosphate est utilisé comme nutriment de la levure
- L'agar agar est utilisé pour la clarification du moût après fermentation

## *II.6. Protocole expérimental*

### *II.6.1. Matériel et équipement de mesure*

- Un thermomètre électronique TH38 est utilisé pour la mesure de la température
- Le degré brix du moût est mesuré avec un réfractomètre R07
- Un mustimètre Dujardin a été utilisé pour le suivi de la densité du moût pendant la fermentation
- Un alcoomètre Dujardin a été utilisé pour l'évaluation du degré alcoolique du produit
- Une balance électronique de précision IoT-Line 572-37 est utilisée pour la mesure des quantités massiques
- Une éprouvette graduée a été utilisée pour la mesure des capacités volumique
- Un vinomètre permet de mesurer le taux d'alcool du vin obtenu
- Un chronomètre a été utilisé pour la mesure de la durée de l'expérience et l'évaluation des intervalles de temps

### *II.6.2. Conduite de l'expérience*

#### *a) Extraction du jus*

- Peser la matière première à travailler (pulpe des déchets de fruit)
- Mettre en marche l'extracteur puis charger régulièrement l'extracteur. Le jus est extrait sur la partie centrale de l'extracteur, tandis que le tourteau de fruit est évacué par l'extrémité
- Peser le jus obtenu après extraction,
- Mesurer le degré brix et la densité du jus obtenu

#### *b) Fermentation*

- Transférer le jus obtenu par extraction dans la cuve de fermentation
- Préparer la culture de levure
- Transférer la culture de levure dans la cuve de fermentation
- Enregistrer la densité et la température toutes les 24 heures

#### *c) Clarification du vin*

- Préparer 10 g d'agar agar puis le mélanger avec 2 litres d'eau chaude
- Après dissolution complète, introduire le mélange dans le moût fermenté
- Remuer rigoureusement le moût fermenté contenant la solution d'agar agar pendant au moins 2 minutes

- La clarification est effective après 06 heures, les particules en suspension vont coaguler puis retomber au fond de la cuve
- Soutirer le vin clair à travers le robinet de soutirage situé sur la paroi latérale inférieure

d) *Préparation de la Chaudière*

- Retirer la cendre au fond du foyer avec une raclette
- Vérifier le niveau d'eau dans la chaudière jusqu'au niveau recommandé
- Fermer la vanne de sortie vapeur

Démarrage de la chaudière

- Charger du bois au-dessus de la grille du cendrier jusqu'au niveau de la chambre de combustion
- Déposer des brindilles ou des feuilles de végétaux aux dessus du bois chargé dans la zone de gazéification
- Ouvrir entièrement les trappes d'air primaire
- Allumer le feu sur les brindilles
- Surveiller le développement de l'allumage
- Fermer légèrement la porte de trémie pour initier le tirage d'air (le tirage est initié lorsque la fumée ressort de la cheminée)
- Remplir entièrement de bois la trémie, jusqu'au niveau du couvercle
- Laisser la combustion se développer
- Lorsque le tirage est entièrement entretenu, fermer entièrement le couvercle puis assurer l'étanchéité avec le joint de sable
- Pendant la chauffe de la chaudière, charger le foyer en bois régulièrement.
- Surveiller régulièrement la production de vapeur à l'aide du manomètre : la chaudière est prête lorsque le manomètre indique 0,6 bars
- Activer le régulateur de niveau d'eau automatique

e) *Conduite de la distillation*

- **Mise en chauffe** : Envoyer de la **vapeur** dans le rebouilleur pour chauffer la colonne et atteindre les conditions de température requises.
- **Démarrage de l'alimentation** : Mettre en marche la **pompe d'alimentation** pour introduire le mélange (produit à distiller) dans la colonne.
- **Ajustement des débits initiaux** : Ajuster simultanément le **débit de vapeur** et le **débit d'alimentation** pour tendre vers le débit de distillat souhaité.
- **Contrôle de la température de tête** : Régler la **température de la tête de colonne** en ajustant le débit du fluide réfrigérant dans le **condenseur de reflux**.

- **Démarrage de la condensation** : Mettre en circulation le fluide réfrigérant dans le **condenseur à distillat** pour recueillir le produit final.
- **Optimisation des paramètres** : Régler finement l'ensemble des paramètres (débit de vapeur, débit d'alimentation, degré de refroidissement des condenseurs) en fonction du **titre** (pureté) et du **débit** du distillat attendus.
- **Maintien de l'équilibre** : Maintenir ces réglages une fois que l'**équilibre** de fonctionnement dans la colonne est atteint.

### II.6.3. Paramètres calculés et analysés

#### a) Rendement d'extraction du jus

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{Q_j}{Q_{\text{FW}}} \quad (\text{Eq 2})$$

Avec :

- $\eta_{\text{ext}}$  Rendement de production de jus [%]
- $Q_j, Q_{\text{FW}}$  Masse de moût et masse de déchet de fruit [L]

#### b) Taux d'alcool probable TAP

$$\text{TAP} = (0,657 \cdot B_x) - 2,038 \quad (\text{PCE Instrument, 2018}) \quad (\text{Eq 3})$$

Avec :

- **TAP** Taux d'alcool probable [%]
- $B_x$  Degré brix du jus [°Brix]

#### c) Durée de la fermentation alcoolique

$$\Delta_{\text{FER}}[\text{h}]$$

Durée entre le début d'ensemencement du moût jusqu'à la fin de la fermentation alcoolique (arrêt d'apparition de bulles dans le moût)

$$\text{TA}_{\text{wine}} [\%]$$

#### d) Taux d'alcool du vin

Cette valeur peut être mesurée avec le vinomètre

e) *Rendement de la fermentation alcoolique*

$$\eta_{FER} = \frac{TA_{wine}}{TAP} \quad (Eq\ 4)$$

Avec :

- $\eta_{FER}$  Rendement de fermentation [%]
- $TAP$  taux d'alcool probable [%]
- $TA_{wine}$  taux d'alcool du vin obtenu [%]

f) *Taux d'alcool du distillat*  $TA_{dist} [\%]$

Cette valeur peut être mesurée avec l'alcoomètre

g) *Productivité moyenne de distillation*

$$\dot{Q}_{dist} = \frac{Q_{dist}}{\Delta_{dist}} \quad (Eq\ 5)$$

Avec :

- $\dot{Q}_{dist}$  Productivité moyenne de distillation [L/h]
- $Q_{dist}$  Volume du distillat [L]
- $\Delta_{dist}$  Durée de la distillation [h]

h) *Rendement de distillation*

$$\eta_{dist} = \frac{TA_{dist} \cdot Q_{dist}}{TA_{wine} \cdot Q_{wine}} \quad (Eq\ 6)$$

Avec :

- $\eta_{dist}$  Rendement de distillation [%]
- $TA_{dist}$  Taux d'alcool du distillat [%]
- $TA_{wine}$  Taux d'alcool du vin [%]
- $Q_{dist}$  Volume total du distillat [L]
- $Q_{wine}$  Volume initial du vin à distiller [L]

i) *Quantité d'alcool pur perdu dans le résidu*

$$Q_{pert} = (1 - \eta_{dist}) * TA_{wine} * Q_j \quad (Eq\ 7)$$

Avec :

- $Q_{pert}$  Quantité d'alcool pur perdue dans le résidu [L]
- $\eta_{dist}$  Rendement de distillation [%]
- $TA_{wine}$  Taux d'alcool du vin après fermentation [%]
- $Q_j$  Masse du moût [L]

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### III.1. Rendement d'extraction en jus

La Figure 6 illustre le pourcentage de jus obtenu à partir de l'extracteur à vis. En général, le rendement se situe entre 51,0% et 54,2%. La valeur moyenne est de 52,2%. Ce rendement représente la quantité de jus que l'on peut retirer à partir de la pulpe. Le tourteau résiduel comporte encore une quantité de sucre relativement élevée, que l'on peut transformer en éthanol. Cependant, pour faciliter les étapes ultérieures, il convient d'utiliser la fraction liquide de la matière première. Le rendement d'extraction peut être augmenté en ajustant la pression au niveau de la sortie de l'extrudeuse. Cette manipulation aura un impact sur la productivité de l'équipement ainsi que l'énergie consommée durant cette étape. Par rapport à la littérature, un taux d'extraction de l'ordre de 78% peut être obtenu selon (N. S. Shah & N. Nath, 2007) [18]. Dans leur procédé, on fait subir à la pulpe de fruit un prétraitement enzymatique destiné à maximiser le taux d'extraction.

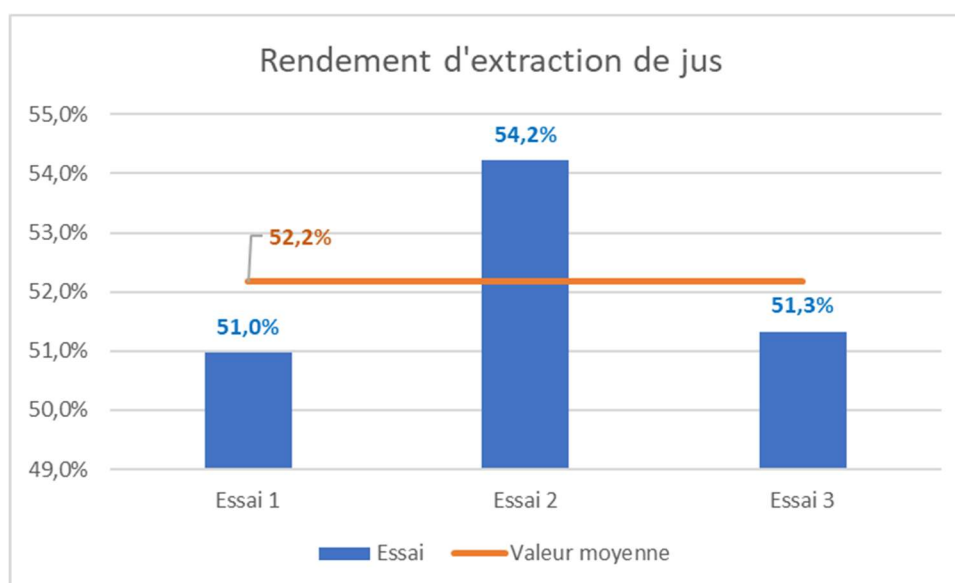


Figure 6: Rendement d'extraction du jus

#### III.2. Déroulement de la fermentation

La Figure 7 illustre l'évolution de la densité et de la température du moût pendant les 3 essais de fermentation. Suivant la quantité de sucre contenue dans la matière première, la densité de départ se situe entre 1,063 à 1,068. Ce niveau de densité

correspond à un degré Brix compris entre 16,5 et 17. Le moût a une densité élevée si son taux de sucre est élevé. Inversement, une densité faible indique un taux de sucre faible. La densité et le degré brix permettent d'estimer le taux d'alcool potentiel que l'on peut obtenir après fermentation, à partir de l'équation (Eq 3).

Après ensemencement, la levure commence à consommer les sucres du moût pour produire de l'éthanol et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). La libération de CO<sub>2</sub> est responsable de l'apparition de bulles à la surface libre du moût.

Le processus de fermentation se traduit par une diminution progressive de la densité du moût. L'achèvement du processus est indiqué lorsque la densité atteint une valeur stable, généralement comprise entre 0,990 et 0,995. À ce stade :

- La densité du moût ne varie plus.
- La température, initialement accrue par la réaction exothermique, commence à décroître pour s'équilibrer à la température ambiante.

Une densité finale inférieure à 1 indique un déroulement normal de la fermentation, signifiant que la quasi-totalité du sucre initialement contenu a été transformée en éthanol. La diminution de la densité est directement corrélée au taux de sucre initial, et donc au titre alcoolique (taux d'alcool) final du moût.

À titre indicatif, une densité de 0,983 correspond à un taux d'alcool d'environ 12,99% [20].

La durée de la fermentation est d'environ 4 jours (96 heures). Cette durée est acceptable afin d'assurer une production d'éthanol à grande échelle. Généralement, on recherche une durée de fermentation la plus faible possible afin de diminuer le temps mort lié à la mise à disposition du vin et réduire le nombre de cuve nécessaire pour l'installation. La bonne préparation de la culture de levure, ainsi que les bonnes conditions de fermentation liées à la température, le pH et la population de levure, ont permis d'écourter la durée de fermentation à 96 heures (S. T. Mgeni et al, 2024).

Durant la fermentation, le graphe de la Figure 7 montre un accroissement de la température du moût. La température passe d'environ 26 °C au premier jour, puis croît progressivement, durant le processus de fermentation. L'augmentation de la température s'explique par la consommation du sucre par les levures, qui libère parallèlement à la production d'éthanol, de l'énergie. Vers la fin du processus, l'activité de la levure est ralentie, car l'ensemble du sucre dans le moût est consommé. Ceci est la cause de la diminution de la température en fin de fermentation. Les résultats obtenus sont en adéquation avec la littérature, qui indique un accroissement de la température pendant la fermentation, et une diminution de celle-ci à la fin du processus [12].

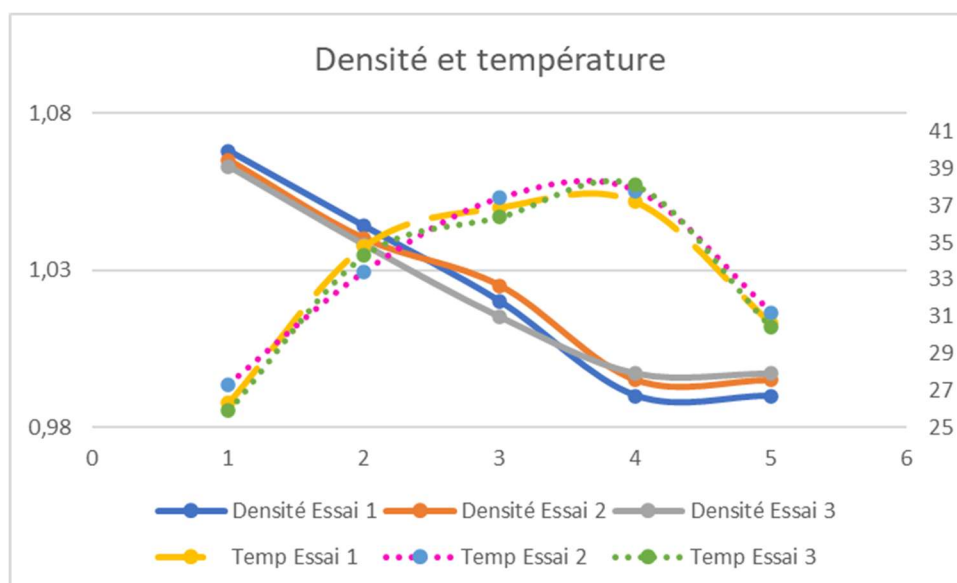


Figure 7: Evolution de la densité et de la température pendant la fermentation

### III.3. Rendement de fermentation

Le rendement de fermentation est un paramètre très important. Il permet d'apprécier l'efficacité de la transformation, d'évaluer le résultat de la fermentation et d'estimer les pertes potentielles en sucre non transformées. Comme il s'agit de production de bioéthanol, il convient d'obtenir un rendement de fermentation le plus élevé possible. Le graphe de la Figure 8 représente la comparaison du taux d'alcool probable par rapport au taux d'alcool effectif dans le vin obtenu après fermentation correspondant aux trois séries d'essai. Ce graphe représente également le rendement de fermentation correspondant. Le taux d'alcool probable (TAP) se situe entre 8,47 et 9,13%. Après fermentation, le taux d'alcool réellement  $TA_{wine}$  obtenu est légèrement inférieur au TAP (7,5 à 8%). Ces résultats correspondent à un rendement de fermentation variant entre 87,61% et 88,61%. L'écart qui existe entre le taux d'alcool probable et le taux d'alcool effectif peut être expliqué par le fait que tout le sucre contenu dans le moût n'est pas entièrement consommé. Il existe du sucre résiduel dans le vin, ce qui aboutit à un degré alcoolique moindre. Ces cas se rencontrent dans la production de vin doux au cours duquel la fermentation est volontairement arrêtée afin d'obtenir un vin légèrement sucré [12]. On peut aussi expliquer l'écart entre le taux d'alcool probable et le taux d'alcool du vin par la présence de sucre non fermentescible par la levure polysaccharide. La concentration de ces composants a un impact sur la densité du moût et peut erroné l'évaluation du taux d'alcool probable. Néanmoins, les chercheurs [13] ont pu obtenir un rendement de fermentation situé entre 92 et 95% avec des conditions de fermentation optimales, un degré brix initial élevé et un taux d'aération suffisant pendant la fermentation. Les matériels et les conditions opératoires mis en œuvre dans le cadre de cette recherche pourront être optimisés afin d'accroître le rendement de fermentation

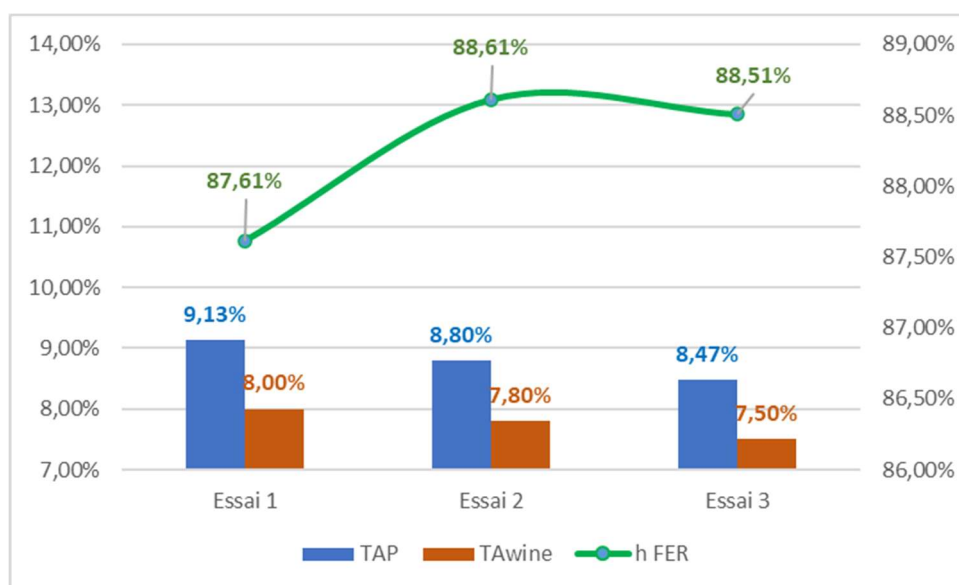


Figure 8: Taux d'alcool probable, taux d'alcool du vin et rendement de fermentation

#### III.4. Productivité et titre alcoométrique du distillat

Les valeurs de la productivité et du titre alcoométrique du distillat sont représentées dans le graphe de la Figure 9. Pour l'ensemble des 3 essais, la productivité moyenne se situe entre 399 et 409 litres d'éthanol par jour avec un degré variant entre 92 et 94%. Ce graphe montre que la productivité oscille autour d'une valeur moyenne de 405 litres par jour. Pour une unité pilote et considérant les équipements mis en place, la valeur de la productivité est acceptable et peut produire annuellement 81000 litres (sur une base de 200 jours). Selon les expériences, la valeur de la productivité correspond à la valeur optimale au niveau de la consommation énergétique, et du degré alcoolique. Ce niveau correspond également au régime nominal de la chaudière qui apporte la quantité de chaleur nécessaire au fonctionnement de l'installation.

Une productivité supérieure peut être obtenue en variant le débit d'alimentation et les paramètres opératoires. Les impacts sont les suivants :

- Augmentation de la consommation énergétique
- Augmentation de la consommation d'eau nécessaire comme réfrigérant au niveau du condenseur à reflux Selon les résultats obtenus, l'installation peut produire de l'éthanol à 94% vol à partir de la distillation de vin titrant

initialement entre 7,5 et 8% d'alcool en une simple passe. L'objectif initial qui était de produire au moins de l'éthanol à 90% est atteint. Ce résultat est obtenu grâce à une hauteur de la zone de rectification suffisante, un bon dimensionnement du condenseur à reflux, ainsi qu'une bonne maîtrise des conditions opératoires. 94% d'éthanol est la valeur maximale que l'on a pu atteindre durant les expériences, même si le débit d'alimentation et le taux de reflux ont été modifiés. Lors du premier essai, certains réglages ne sont pas encore maîtrisés, ce qui a donné un degré alcoolique égal à 92%, qui est légèrement inférieur à la valeur maximale. Pour les essais 2 et 3, le fonctionnement de la colonne est maîtrisé, permettant d'obtenir un titre du distillat égal à 94%. Comparativement à la littérature, les auteurs [21] ont obtenu un titre alcoométrique de 96,8% avec une colonne composée de 7 plateaux, une optimisation du débit d'alimentation et un taux de reflux de 5. Les auteurs [14] ont obtenu un degré alcoolique de 98.78% en faisant fonctionner la colonne sous une pression de 300mbar et un taux de reflux de 0,9.

Cependant, l'éthanol produit par l'installation pilote a un degré alcoométrique supérieur à la limite de 90% fixée par la loi N° 2013-013 portant sur la production et la commercialisation, l'éthanol produit par la colonne (Republikan'i Madagasikara, 2014). Ainsi aucune modification supplémentaire n'est à prévoir sur l'installation et particulièrement la colonne de distillation,

si le produit obtenu sera utilisé comme combustible dans les réchauds domestiques.

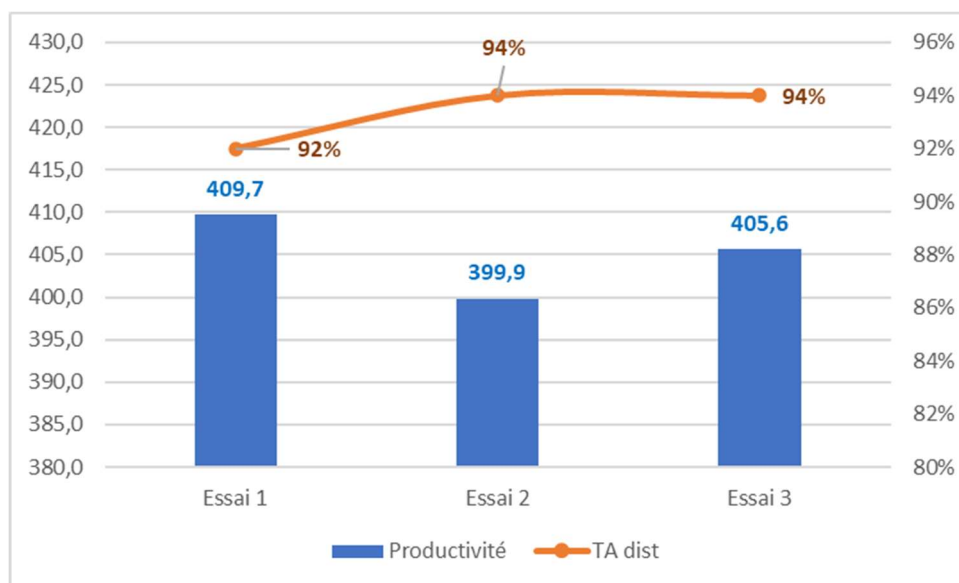


Figure 9: Productivité et titre alcoométrique du distillat

### III.5. Rendement de distillation et perte en alcool

La Figure 10 illustre le rendement de la distillation et la quantité d'alcool pur perdu dans la vinasse. Ces paramètres permettent d'apprécier la performance de la colonne de distillation. Un rendement de distillation faible indique une quantité importante d'alcool perdu dans le résidu de distillation ou vinasse. Inversement, un rendement de distillation élevé correspond à une colonne de distillation performante, qui minimise les pertes dans le résidu. La colonne de distillation a un rendement compris entre 91,30% et 93,44%. Environ 6 à 8% de l'éthanol contenu dans le vin n'est pas récupéré au niveau de la colonne. Cette quantité est perdue lors de la séparation au niveau de la vinasse. Le rendement peut être amélioré en limitant les pertes d'alcool dans la vinasse. Pendant la distillation, il est recommandé d'avoir une température de la vinasse la plus élevée possible pour s'assurer que l'éthanol au fond du rebouilleur passe à l'état vapeur et ne se mélange pas à la fraction liquide. Le rendement obtenu est en adéquation avec les colonnes de distillation fonctionnant en continu. De manière générale, la littérature admet que le taux d'alcool résiduel dans la vinasse devrait être inférieur à 0,5% [15], ce qui correspond à un rendement de distillation de l'ordre de 94% dans notre cas. En valeur absolue, la quantité de perte en alcool représente 5,4 à 7,57 litres. Ces pertes dépendent du rendement de la colonne de distillation et du volume de vin à traiter.

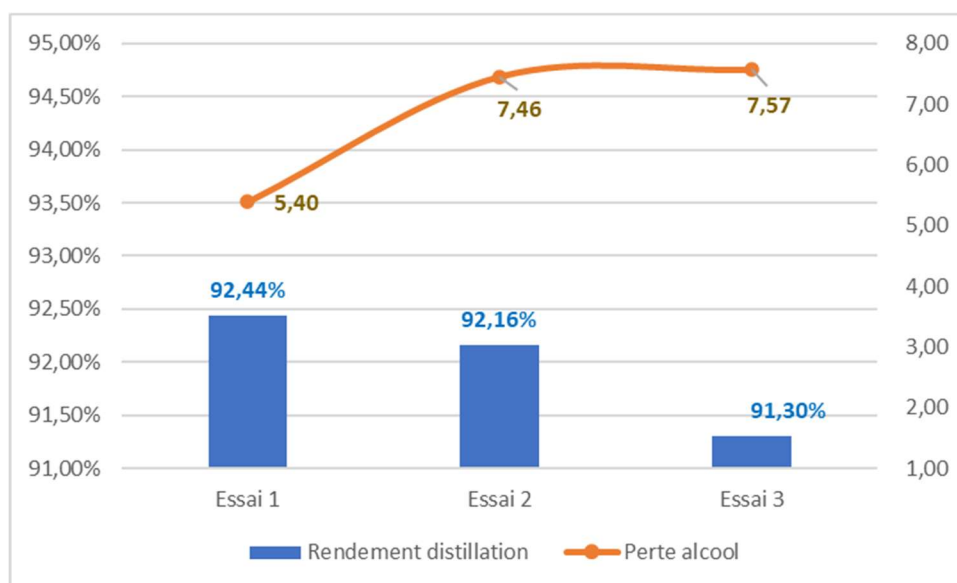


Figure 10: Rendement de distillation et perte en alcool

#### IV. CONCLUSION

Ce travail a présenté la recherche sur la production de bioéthanol à partir de déchet de fruit, qui peut être utilisé comme alternative à l'énergie utilisée des ménages malgaches. A cet effet, l'étude s'est focalisée sur la conception, le développement d'une unité pilote de production de bioéthanol. L'installation a nécessité de concevoir, de dimensionner, de réaliser et de mettre en œuvre un extracteur à vis permettant de récupérer le jus sucré à partir de la pulpe du déchet de fruit, 4 cuves de fermentation permettant de transformer le sucre contenu dans le jus en éthanol, une colonne de distillation assurant la séparation en continu de l'eau et de l'éthanol du vin obtenu après fermentation et une chaudière fonctionnant à la biomasse, qui assure l'apport de chaleur dans le processus de distillation. Les résultats des essais de performance montrent que le rendement d'extraction du jus est de 52,2%. Maintenir de bonnes conditions de fermentation permet d'avoir une durée de fermentation de 4 jours (96 heures) avec un rendement de fermentation moyen de 88,24%. La colonne de distillation en continue, couplée avec la chaudière à biomasse permet de produire 405 litres d'éthanol par jour, avec un degré alcoolique de 94% vol à partir vin titrant initialement entre 7,5 et 8% d'alcool. Cette colonne a un rendement de distillation compris entre 92,16% et 94,46%. Les résultats de montrent que l'installation pilote a un niveau de performance satisfaisante, et que la production de bioéthanol, peut être réalisée à l'échelle industrielle.

## REFERENCES

- [1] WWF (2012). Diagnostic du secteur Energie à Madagascar. Antananarivo : WWF Madagascar.
- [2] Jean Luc Rasoanaivo .et al, « *Production of ethanol from Banana fruit waste. Case of the Murisseries wholesalers of the City of Antananarivo, Madagascar*» International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education (IJARIE)-ISSN(O)-2395-4396 Vol-6 Issue-1 2020 ; Paper Id : 11277 ; pp 534-542
- [3] Mgeni, Mero, & Mtashobya, 2024, The prospect of fruit wastes in bioethanol production: A review, *Heliyon*, 2024 Oct 1;10(19):e38776. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e38776. eCollection 2024 Oct 15.
- [4] Practical Action, 2018, Sharma et al., 2025, E. Kandemir et al, 2022, Fruit Juice Industry Wastes as a Source of Bioactives
- [5] Cerino, M.C., et al "Production of high-added value ingredients... *Foods*, 12(1), Article 148 . (2023)..
- [6] Chojnacka, KBio-based fertilizers... *Baltic Rim Economies*, (2), 38-40 . (2024).
- [7] R. AKPASSONOU et al., Valorisation énergétique des déchets issus de la transformation de l'ananas en jus à promo fruits Bénin: Etude de faisabilité et émergence de solution2023 .
- [8] M. ANDRIAMANDROSO, A review on the use of sensors to monitor cattle jaw movements and behavior when grazing 2016.
- [9] Combustibles densifiés 2024 : Chojnacka K. (2024). Bio-based fertilizers... (lié à biomasse densifiée). *Baltic Rim Economies*, 2, 38-40, 2024.
- [10] Ravoninjatovo, A.O et al Production d'éthanol à partir des déchets de pasteurisation de jus de fruits : cas de la société Mada Pasteurisation Export (MPE SA). *Mada-Hary*, 10(4), 85-102, (2021).
- [11] N. S. Shah & N. Nath, 2007, Minimally processed fruits and vegetables - Freshness with convenience, *Journal of Food Science and Technology -Mysore-* 43(6):561-570
- [12] P. Saranraj et al, 2017, Fermentation of fruit wine and its quality analysis: A review, ISSN Number (2208-6404) Volume 1; Issue 2; December 2017
- [13] A L Demain , M Newcomb , & David , 2005, Two components of an extracellular protein aggregate of *Clostridium thermocellum* together degrade crystalline cellulose, Vol 27/Issue 5
- [14] Manayay et al, 2015, Optimization the Continuous Distillation Process of an Aqueous Ethanol Mixture, *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 16 (2018) pp. 12983-12986 © Research India Publications. <http://www.ripublication.com>
- [15] G. C. Del Vecchio et al, 2024, Entanglement Rényi entropies from ballistic fluctuation theory: The free fermionic case, *Revue : SciPost Physics Core*,  
Volume : 7, Numéro : 1, Pages: 005
- [16] Design, Fabrication and Testing of a Manual Juice Extractor for Small Scale Applications — *CJAST*, 2017
- [17] Fermeglia, M. (2021). Binary distillation: McCabe Thiele method. Department of Engineering & Architecture, University of Trieste. 12 April 2021
- [18] Shah, N. S. & Nath, N. (2007). Optimization of an Enzyme Assisted Process for Juice Extraction and Clarification from Litchis (*Litchi Chinensis* Sonn.). *International Journal of Food Engineering*, Vol. 3, Issue 2 (ou 3)
- [19] Ibrahim, A. A., Ghali M. Jibril & Osang, B. (2018). A Review of the Design and Analysis of a Fire Tube Boiler. *Journal of Engineering and Applied Scientific Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 61-79.



- 
- [20] Ofoegbu, Deborah Chinwendu & Mbaeyi-nwaoha, Ifeoma. (2022). Sensory profile and physicochemical composition of premixed and post-mixed fruit wine from blends of pineapple and watermelon juice. *Toros University Journal of Food, Nutrition and Gastronomy (JFNG)*, 1(1), 27–33
- [21] Cortella, G. & Da Porto, C. (2003). Design of a continuous distillation plant for the production of spirits originating from fermented grape. *Journal of Food Engineering*, 58(4), 379–385.