

Performance et productivité en bioéthanol de plantes amylacées de la variété *Colocasia esculenta* par rapport à celle de *Dioscorea Alata* dans le district de Befandriana nord.

ANDRIANANTENAINA Jocel¹, RAKOTOBÉ Emilien², ZARAMANANA Estelle³, LEHIMENA Eliana⁴, RASOAMANJAKA Sidonic⁵, RAJESITERA Fabian⁶, RASOLONJATOVO Martial Zozime⁷, RASOANANDRASANA Emilienne⁸

Enseignant Vacataire à la Faculté des Sciences, de Technologies et de l'Environnement Université de Mahajanga

Résumé

L'objectif de ce travail de recherche est de produire du bioéthanol à partir de deux plantes amylacées : l'igname ou *oviala* en malgache, de l'espèce *alata*, de la famille *Dioscorea* et le taro ou *saonjo dia*, de la famille des *Aracées*. Ces deux plantes sont abondantes dans la région Sofia en l'occurrence dans le district de Befandriana Nord. Elles sont utilisées comme aliment de substitution en période de soudure. A cause de leur richesse en amidon, elles répondent aux critères de production de bioéthanol. Ce travail de recherche consiste à transformer les tubercules de l'igname et de taro en bioéthanol moyennant la technologie de l'hydrolyse enzymatique. La farine de tubercule est hydrolysée par des amylases issues des grains de paddy germés et fermentés par le biais de la levure *Saccharomyces cerevisiae* et puis distillés. Deux échantillons identiques de 8000 g de tubercules de taro et d'igname ont été transformés en bioéthanol dans les mêmes conditions au laboratoire du Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT). Les résultats ont montré que les paramètres optimaux de la fermentation correspondent à un taux de levure de 5% et une durée de fermentation de 3 jours. Le taux d'atténuation du taro est plus significatif (62,50%) par rapport à celui de l'igname (56,25%). Du point de vue distillation, le volume d'éthanol obtenu est de 6228 ml pour le taro contre 6083 ml pour l'igname. Le degré alcoolique varie de 10° à 72°GL pour le taro et 9° à 70°GL pour l'igname. La rectification de 6228 ml d'éthanol a permis d'obtenir 2771 ml de bioéthanol dont 2149 ml de degré alcoolique variant de 82° à 92°GL, soit 77,55% et le reste soit 622 ml avec un degré alcoolique variant de 65° à 72°GL.

Ce travail de recherche a permis de mettre en évidence la performance, l'efficacité énergétique et la productivité en bioéthanol du taro face à l'igname du District de Befandriana Nord. Il est à souligner que cette recherche a permis de disposer des valeurs de référence sur la fermentation, la distillation et la rectification en utilisant la technologie d'hydrolyse enzymatique.

Mots clés : plante amylacée- taro- igname-hydrolyse enzymatique-bioéthanol – performance – productivité – District Befandriana nord.

Abstract

The aim of this research project is to produce bioethanol from two starchy plants: yam, or *oviala* in Malagasy, of the *alata* species, in the *Dioscorea* family, and taro, or *saonjo dia*, in the *Aracaeae* family. Both plants are abundant in the Sofia region, in particular in the Befandriana Nord district. They are used as a substitute food during the lean season. Because of their high starch content, they meet the criteria for bioethanol production. This research project involves converting yam and taro tubers into bioethanol using enzymatic hydrolysis technology. Tuber flour is hydrolyzed by amylases derived from sprouted paddy grains, fermented with *Saccharomyces cerevisiae* yeast and then distilled. Two identical 8,000 g samples of taro and yam tubers were transformed into bioethanol under the same conditions in the laboratory of the Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT). Results showed that optimal fermentation parameters correspond to a yeast content of 5% and a fermentation time of 3 days. The attenuation rate for taro is more significant (62.50%) than for yam (56.25%). From the distillation point of view, the volume of ethanol obtained is 6228 ml for taro versus 6083 ml for yam. Alcohol content ranged from 10° to 72°GL for taro and 9° to 70°GL for yam. Rectification of 6228 ml of ethanol yielded 2771 ml of bioethanol, 2149 ml of which had an alcoholic strength ranging from 82° to 92°GL, i.e. 77.55%, while the remainder, 622 ml, had an alcoholic strength ranging from 65° to 72°GL.

This research highlighted the performance, energy efficiency and bioethanol productivity of taro compared with yam in the Befandriana Nord district. It should be emphasized that this research provided reference values for fermentation, distillation and rectification using enzymatic hydrolysis technology.

Key words: starch plant - taro- yam - enzymatic hydrolysis - bioethanol - performance - productivity - North Befandriana District.

1. Introduction

Face aux changements climatiques, à la demande croissante en énergie, l'instabilité du prix du pétrole sur le marché international et les pénuries d'énergie, la recherche de nouvelle source d'énergie de remplacement, efficace économiquement, équitable socialement et rationnelle du point de vue de l'environnement n'est plus à éviter. La quête d'alternatives énergétiques durables est devenue cruciale face aux défis environnementaux et économiques mondiaux. La bioénergie est considérée comme une voie prometteuse pour les énergies renouvelables en l'occurrence, le bioéthanol produit à partir de matières premières locales qui représentent dans ce cadre une solution prometteuse pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles tout en valorisant les ressources agricoles locales.

Le district de Befandriana Nord est une localité riche en ressources naturelles comme le *Dioscorea Alata* dénommée « igname » ou en malgache « ovy ala » et le *Colocasia esculenta* appelé aussi « taro » ou « saonjo dia » en malgache. Que ce soit le *Dioscorea Alata* ou le *Colocasia esculenta*, ce sont des denrées alimentaires de première importance pour plusieurs nations différentes [1]. A cause de sa haute teneur en féculé, elle assure un approvisionnement de base en énergie dans les zones rurales.

A Madagascar, l'igname en général, se trouve comme plante sauvage et aussi considérée comme une plante endémique. Mais comme les plantes amylacées et les plantes à tubercules, elle est encore peu exploitée malgré leur abondance et leur richesse.

Elle fait partie de ces espèces qui sont riches en amidon et abondante dans la région de Sofia en l'occurrence dans le District de Befandriana Nord.. En ce qui concerne le taro, c'est une plante à tubercule où les tubercules de *Colocasia esculenta* se consomment sous différentes formes. Elles peuvent être bouillies, frites, grillées et transformées en « fougou ». C'est un aliment de base pour de nombreuse population africaine.

A Madagascar, les tubercules sont cuits avec de l'eau bouillie, additionnée du sucre et accompagnée ou non du lait du coco pour faire le « sahoaba ».

Que ce soit l'igname ou le taro, ils répondent aux critères requis pour la production de bioéthanol. L'objectif de ce travail de recherche est de produire du bioéthanol à partir de plantes amylacée à partir des deux variétés *Dioscorea Alata* et *Colocasia esculenta* dans le district de Befandriana Nord de la région Sofia afin d'évaluer respectivement leur performance, leur efficacité énergétique ainsi que leur productivité.

2. Méthodologies

2.1. Situation de l'igname et du taro à travers le monde

2.1.1. Situation de l'igname au niveau mondial

L'igname est utilisée depuis toujours comme plante vivrière. Elle appartient au genre *Dioscoréa* et comprend plus de 600 espèces. Elle couvre tous les continents et est adaptée à des environnements écologiques différents : régions tropicales, savanicoles ou forestières, zones d'altitude, milieux tempérés [2]. La production mondiale d'igname est concentrée à 90 % en Afrique de l'Ouest et du Centre. On distingue plus de 150 types d'igname en fonction de la texture, de la qualité de l'amidon, de la couleur et de la taille [3].

Ce sont des plantes grimpantes, volubiles, souvent dioïques. Les feuilles pétiolées, cordiformes, sont selon les espèces alternées ou opposées. Les tubercules de forme variable, ovoïde à oblongue, parfois aplatie ou en forme de massue allongée, peuvent atteindre 1 m de longueur et leur poids, généralement de 3 à 5 kg peuvent aller jusqu'à 15 kg. Ils sont garnis d'yeux comme les pommes de terre. La peau est généralement brunâtre à noirâtre. La chair est généralement blanche, parfois jaunâtre.



Figure 1 : *Tubercule de Dioscoréa Alata*
(Cliché : Auteur)

2.1.1.1. Composition biochimique de l'igname

La composition chimique de quelques ignames a déjà été déterminée. Ainsi, les tubercules d'ignames contiennent 25% d'amidon (comme les pommes de terre), et environ 7% de protéines. Selon BOURRET-CORTADELLAS (1973), leur apport protéique est deux à trois fois supérieur à celui du manioc. Ces organes sont très pauvres en matières grasses mais assez riches en vitamine C et en minéraux (calcium, phosphore et fer). Ils sont déficitaires en aminoacides soufrés et en tryptophane.

2.1.1.2. Utilisations actuelles

a) Utilisations alimentaires

Les tubercules riches en amidon sont consommés presque exclusivement dans les régions tropicales. Les ignames se consomment cuites, braisées, ou frites. Selon les espèces et variétés, le goût est très variable, très agréable, tendre et sucré dans certains cas, farineux, à goût de châtaigne le plus souvent. Certaines espèces sont âcres ou amères, mais pas véritablement toxiques [2].

A Madagascar, elle est consommée pendant les périodes de soudures comme les plantes à tubercules, et participe à l'apport nutritionnel des paysans. Dans la région Est de Madagascar, elles sont épluchées, coupées et cuites à l'eau salée où son nom est « *sambaika* », et ou sucrée qu'ils appellent « *kadaka* ».

b) Utilisations non alimentaires

L'igname est valorisée et transformée en différents produits. Quelques espèces sont utilisées pour produire des produits en pharmacie et en industrie [2].

A Madagascar, les recherches commencent à transformer l'igname en éthanol pour être à la disposition des industries chimiques, cosmétiques et pour la bioénergie.

2.1.2. Situation du taro au niveau mondial

En 2021, la production de taro était de 12,3 millions de tonnes. Il s'agit d'une légère baisse par rapport à la production de l'année précédente qui était de 12,6 millions de tonnes [4]. Le taro est l'espèce la plus cultivée de la famille des Araceae, utilisée comme légume. Des pays comme les États-Unis, l'Australie, le Japon et la Nouvelle-Zélande constituent le principal marché d'importation.

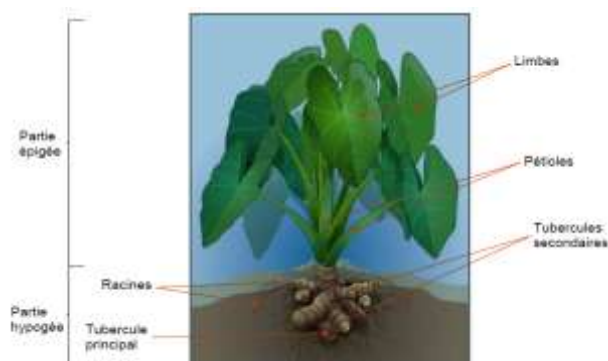


Figure 2 : *Colocasia esculenta*Source : <https://www.taro-plant-stock-illustration.com>**2.1.2.1. Valeur nutritive**

Le taro constitue un aliment de base pour des habitants de certaines régions d'Afrique et d'Asie eu égard à certaines de ses qualités nutritives. En effet, de nombreuses variétés de taro ont des tubercules qui fournissent des amidons très digestibles, intéressants pour les malades et les nourrissons (WANG, 1983). Leurs feuilles sont consommées comme légumes verts. Elles ont des teneurs élevées en thiamine, ce qui de nos jours est un avantage car les feuilles permettent aux populations de consommer des glucides raffinés. Elles sont également une excellente source de vitamine C, de niacine et de riboflavine qui sont toutes des vitamines nécessaires pour l'organisme.

2.1.2.2. Les diverses utilisations**a) Les feuilles**

Les feuilles de taro sont plus riches en protéines que les tubercules. Elles contiennent en moyenne 20 % de protéines, alors que, les tubercules n'en contiennent que 4 %. Les feuilles et les pétioles de taro s'emploient comme légume-feuilles et comme herbe potagère pour les soupes et les sauces, ou comme condiment.

b) Usages médicaux

Les usages médicaux de *Colocasia* sont peu nombreux. Au Gabon, les tubercules râpés sont appliqués en cataplasme pour accélérer la maturation des furoncles, pour traiter les morsures de serpents et le rhumatisme. Aux Caraïbes, l'utilisation d'extraits de feuilles de *Colocasia* additionnés à la tisane lutte contre la diarrhée

c) Alimentation animale

Toutes les parties de la plante, à savoir les tubercules, les feuilles et pétioles, les rejets et les épluchures constituent des compléments de l'aliment du bétail. Les restes de la consommation humaine comme les petites cormes, les cormes attaquées par des insectes et refus de semence sont destinés aux animaux notamment le porc et la vache laitière

3. Zone d'étude : District de Befandriana Nord –Région Sofia**3.1. Localisation**

Befandriana-Nord est la première agglomération du district, et l'une des sept villes qui constituent la région Sofia. Elle est située dans le Nord-Ouest de Madagascar et s'étend entre 14°17' et 15°34' de latitude sud, et 47°49' et 49°5' de longitude est, à 86km du district d'Antsohihy, qui est le chef-lieu de la région Sofia, sur la route nationale n°32, vers Mandritsara.

La commune urbaine de Befandriana-nord est l'une des 12 communes qui constituent le district de Befandriana -nord. Elle est limitée au nord par la commune rurale d'Ambararata, à l'est par la commune rurale de Maroamalona. À l'ouest et au sud, elle est limitée par la commune rurale de Morafeno. La ville est traversée par une rivière appelée *Somboaña*, qui la partage en deux parties : la rive gauche et la rive droite. La figure 3 présente les différentes fokontany de la ville de Befandriana Nord.

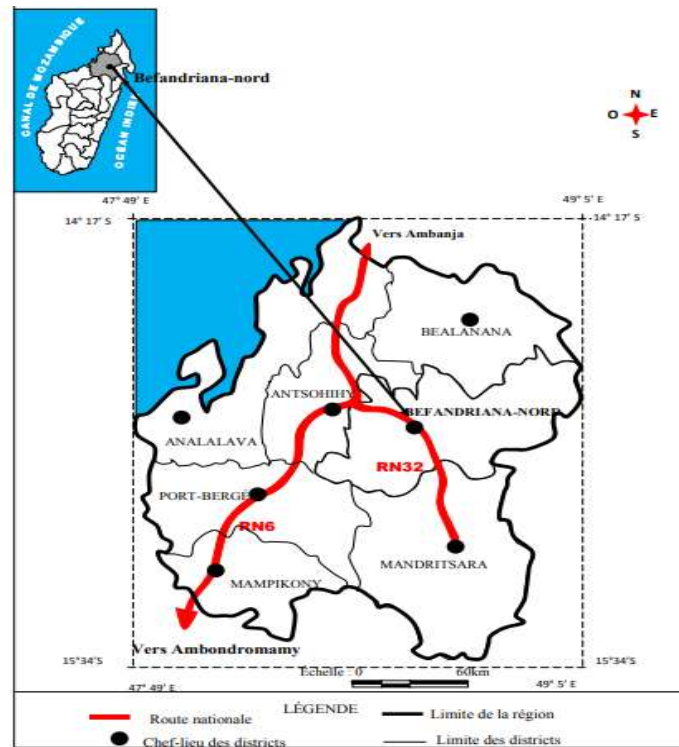


Figure 3 : Carte du district de Befandriana Nord- Source FTM 2016

3.2. Climat

Comme toutes les villes des hautes terres malgaches, Befandriana-nord connaît deux saisons : saison chaude et pluvieuse de novembre à avril et saison sèche du mois de mai au mois d'octobre. La saison sèche s'accompagne d'une certaine fraîcheur, surtout au petit matin, mais les températures sont en général constantes au cours de l'année, l'amplitude thermique reste généralement faible, la moyenne des minimas est de 22°C et celle des maximas, de 34°C.

3.3. Population

La ville de Befandriana-nord compte 4200 habitants en 1975, en 1993, on dénombre 6891habitants⁴⁸, c'est-à-dire un accroissement de 2321 habitants en 16ans, soit un taux d'accroissement de 4,6% habitants/an. Depuis l'année 2000, on constate une augmentation spectaculaire de la population urbaine, due aux fonctions socio-économiques de la ville : fonction commerciale, culturelle et administrative. Sa population était au nombre de 36689 habitants en 2015(3% de la population Sofia en 2007) pour une superficie de 16,3km², soit une densité moyenne de 2683hab /km². Sa population a été ainsi multipliée par six en 22 ans, avec un taux d'urbanisme de 15%.

3.4. Economie

L'économie de la ville repose surtout sur le secteur primaire : la culture du riz, de manioc, du maïs, l'apiculture et l'élevage de bovins, de porcs et plus récemment d'ovins (chèvres) ainsi que la récolte de fruits tels que : mangues, bananes, papayes, jaques, litchis, corossols...etc.

Le secteur tertiaire tel que les commerces de proximité sont très peu développés. Le secteur secondaire (transformation des matières premières) est pratiquement inexistant.

3.4.1. Agriculture

La population de la commune de Befandriana-nord est une population agricole, au moins 95% de la population locale gagne leur vie sur l'agriculture. Les activités de subsistance et génératrice de revenu de la population sont multiples. Elles sont caractérisées par la domination de l'activité rizicole et le petit élevage. Les activités agricoles constituent la principale source de revenu. D'une manière générale, elle pratique la culture vivrière, la culture de rente, la culture fruitière et la culture industrielle.

3.4.2. Elevage

Comme toute la commune dans le district de Befandriana, la population pratique des petits élevages très diversifiés. Ce sont d'élevage de bovin, d'ovin, des volailles. Le mode d'élevage pratiqué est un élevage extensif à base traditionnel. La production surtout les volailles est destinée à la vente sur le marché

hebdomadaire en cas de besoin immédiat de l'argent. Ces petits élevages constituent essentiellement une rentrée de revenu supplémentaire pour les ménages.

4. Processus de production d'éthanol et de bioéthanol à partir du taro et de l'igname

4.1. Processus de production d'éthanol à partir du taro/ de l'igname (plante amyliacée)

4.1.1. Méthodologie adoptée

L'objectif général de cette étude étant d'essayer de rechercher les paramètres optimaux du processus de production d'alcool à partir du taro/ igname.

Les objectifs spécifiques consistent à :

Produire de l'alcool de haute qualité et de degré alcoolique élevé à partir de plante amyliacée (taro/ igname) par des techniques souples, fiables et de faible coût.

Afin d'atteindre l'objectif fixé, la démarche méthodologique suivante a été adoptée :

- identification du mode de prétraitement et technique d'hydrolyse adéquate
- détermination de la quantité de levure et la durée de fermentation optimales
- Identification de la température de consignes limites respectives du bouilleur et de la tête de la colonne.

4.1.1.1. Prétraitement et technique d'hydrolyse

a) **Le triage** : pour éliminer les produits de mauvais état (présentant par exemple d'énormes traces de moisissure)

b) **Lavage** : pour enlever les diverses saletés et souillures (boue etc...)

c) **Epluchage** : pour enlever l'écorce extérieure

d) **Découpage en morceau et broyage** : pour obtenir un mélange fin homogène d'amidon et du taro, prêt pour l'opération d'hydrolyse.

La photo 1 montre les différentes étapes des prétraitements :

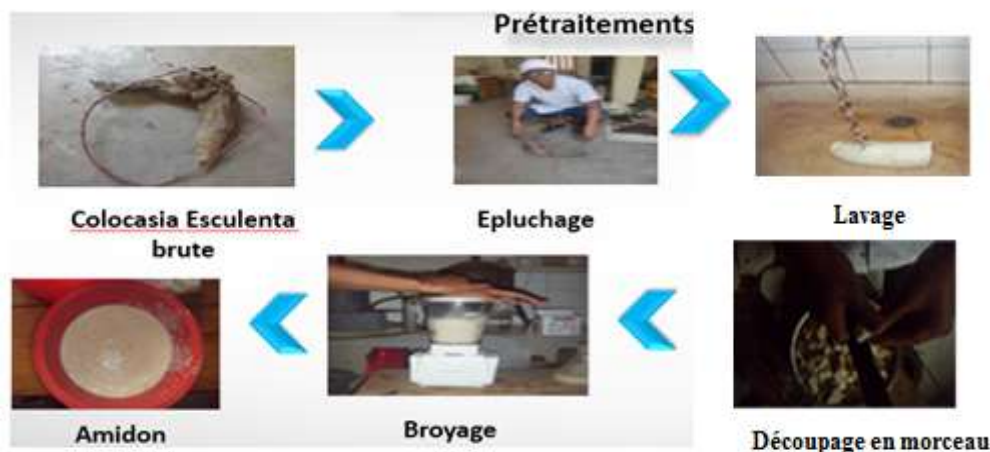


Photo 1 : Différentes étapes de prétraitement du taro brute

4.1.1.2. Préparation de l'amylase

Les principales étapes de préparation de ces grains de paddy pour obtenir l'enzyme sont les suivantes :

- **Trempage** : Humidification de grains de paddy et conditionnement dans un endroit chaud et humide durant 24 à 48 h pour faciliter et accélérer la germination.
- **La germination** : C'est la période pendant laquelle l'orge commence à germer. et donc produit les enzymes telles que l'amylase. Cette étape dure quatre à six jours. Ce qui donne naissance à ce qu'on appelle 'malte vert'. La photo 2 montre la germination du grain de paddy :



Photo 2 : Germe de grain de paddy

La photo 3 montre les différentes étapes de la préparation de l'enzyme.



Photo 3 : Différentes étapes de préparation de l'enzyme

4.1.1.3. Hydrolyse

L'hydrolyse est la transformation de l'amidon en sucre fermentescible sous l'action des enzymes à une température donnée et sous agitation permanente. L'hydrolyse comporte deux étapes :

a) La gélification

La gélification est la cuisson du taro/igname à la température de 75°C pendant 45 minutes environ, couplée avec une agitation. La gélification consiste à modifier la structure de l'amidon par l'action de chaleur et de l'eau. En effet, de par sa structure semi-cristalline, l'amidon est pratiquement insoluble dans l'eau froide et porté à la température de 75°C, il devient amorphe et miscible à l'eau. La gélification préalable de l'amidon du taro facilite l'action des enzymes présents dans le malt.

La proportion adoptée pour cette opération étant 1,5 litre d'eau pour 1 kg de taro.

b) La liquéfaction

La liquéfaction consiste à l'activation de l'enzyme au jus de taro gélifié. Ainsi on a procédé à mélanger 1 kg de taro gélifié avec 0,25 Kg de lait de malt. Ce dernier étant obtenu par dilution de la poudre provenant de la germination du paddy avec de l'eau. Cette étape s'effectue à la température de 55°C pendant 40 minutes sous agitation permanente.

L'opération de gélification et hydrolyse est illustrée par la série de photos 4 :

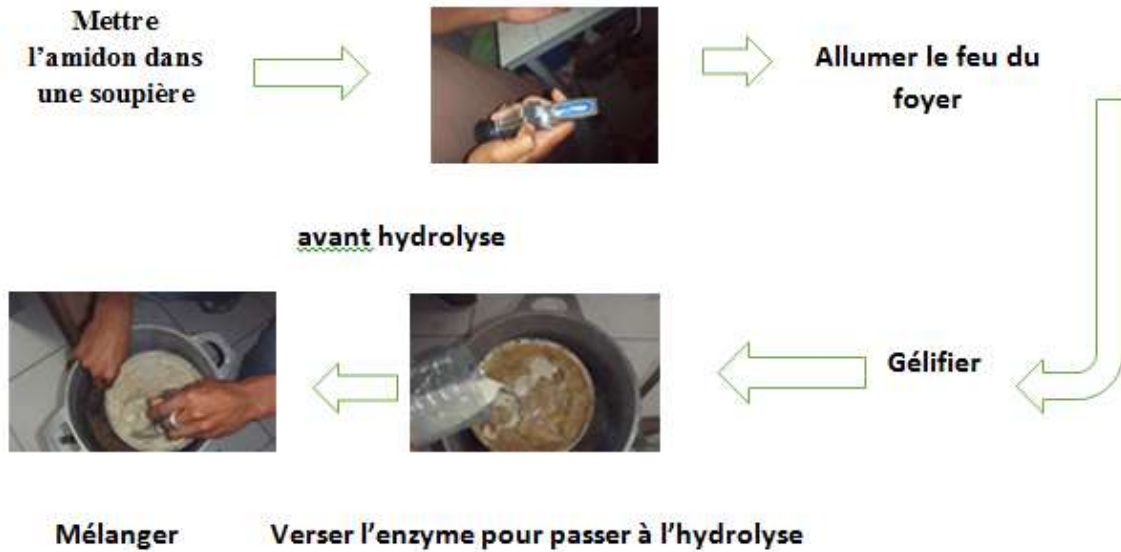


Photo 4 : Gélification et hydrolyse

4.1.1.4. Quantité de levure et durée de fermentation

4.1.1.4.1. Fermentation

La fermentation est une réaction biochimique de conversion de l'énergie chimique contenue dans une source de carbone (souvent du glucose) en une autre forme d'énergie directement utilisable par la cellule en l'absence de dioxygène (milieu anaérobie). La fermentation consiste à transformer le glucose en éthanol. Pour ce faire, l'ajout de levures au mélange est nécessaire. La durée de la fermentation est d'environ une semaine. La fermentation alcoolique doit s'effectuer en anaérobiose, à une température entre 15°C et 35°C. Le milieu anaérobie permet à la levure de changer le glucose en éthanol.

Le mode opératoire de la fermentation est illustré par la photo 5.



Photo 5 : Préparation à la fermentation

4.1.1.4.2. Température de consignes limites respectives du bouilleur et de la tête de la colonne.

a) Distillation

Juste après la fermentation, on obtient ce que l'on appelle un moût, on prépare ensuite le distillateur puis on charge le moût dans le bouilleur. Vérifier l'herméticité des tuyauteries du distillateur pour éviter les éventuelles fuites de vapeur et démarrer la distillation.

Les étapes de la distillation sont illustrées par la photo 6.



Photo 6 : Etapes de distillation

b) Rectification

La rectification, aussi appelée distillation fractionnée, est un procédé de séparation par fractionnement. Son but est de séparer les différents constituants d'un mélange de liquides miscibles, possédant des températures d'ébullition différentes. Pour cela, elle exploite le même principe que la distillation classique mais se distingue par l'utilisation d'une colonne de séparation, qui permet une meilleure discrimination des constituants du mélange.

L'opération devra s'effectuer à une température bien contrôlée car la température d'ébullition de l'eau étant 100°C et celle de l'éthanol 78°C.



Photo 7 : Rectification

5.1. Résultats des essais de Fermentation

5.1. Résultats des essais de la Fermentation

La fermentation se déroule en milieu non renouvelé, en faisant varier le pourcentage de la levure et la durée de la fermentation pour une même masse du taro/igname hydrolysé. Les résultats de la fermentation des deux variétés : taro et igname seront résumés dans le tableau 1:

Tableau 1 : Fermentation

| Variété : Taro | | | | | | | | Variété : Igname | | | | | | | |
|----------------|-------------------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|------------------|---------------------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| N° essai | Taro hydrolysé(g) | Levure (%) | Levure (g) | Durée fermentation (jrs) | Sucre avant fermentation | Sucre après fermentation | Atténuation (%) | N° essai | Igname hydrolysé(g) | Levure (%) | Levure (g) | Durée fermentation (jrs) | Sucre avant fermentation | Sucre après fermentation | Atténuation (%) |
| 1 | 8000 | 5 | 400 | 3 | 16 | 6 | 62,5 | 1 | 8000 | 5 | 400 | 3 | 16 | 7 | 56,25 |
| 2 | 8000 | 7 | 560 | 4 | 14,5 | 8 | 44,83 | 2 | 8000 | 7 | 560 | 4 | 14,2 | 7,5 | 47,8 |
| 3 | 8000 | 8 | 640 | 5 | 14 | 8 | 42,86 | 3 | 8000 | 8 | 640 | 5 | 14 | 8 | 42,86 |
| 4 | 8000 | 9 | 720 | 6 | 13 | 8 | 38,46 | 4 | 8000 | 9 | 720 | 6 | 13 | 8 | 38,46 |
| 5 | 8000 | 10 | 800 | 7 | 11 | 7 | 36,36 | 5 | 8000 | 10 | 800 | 7 | 11 | 8 | 33,33 |

Ce tableau montre qu'en utilisant la même quantité de matière première (taro ou igname hydrolysée : 8000 g), l'atténuation du taro est plus significative par rapport à celle de l'igname. L'essai numéro 1 a un rendement de fermentation le plus élevé de 62,50% avec la variété Taro, réalisé avec un taux de levure de 5%, pendant une durée de fermentation de 3 jours. Les paramètres optimums de la fermentation seront :

- taux de levure de 5%,
- durée de fermentation de 3 jours

Rappelons que l'atténuation du taux de sucre après la fermentation est donnée par la formule suivante:

$$\text{Atténuation} = \frac{E - E_a}{E}$$

E : Taux de sucre dans la solution initiale

E_a : Taux de sucre à l'état final

5.2. Résultats des essais de la Distillation

Il est à remarquer que le volume du distillateur du laboratoire du CNRIT étant trop petit, si bien que la distillation du moût issu d'une opération de fermentation s'est déroulée en deux vagues.

En outre, les séries de distillation se sont passées dans les mêmes conditions. Le contrôle de la température à la tête du distillateur s'est opéré par l'intermédiaire d'un thermomètre à mercure.

La distillation issue des 5 fermentations a été donc effectuée en 5 séries pour chaque variété de ressource naturelle : taro, igname.

5.2.1. Première série de distillation

Tableau 2 : Première série de distillation

| Variété : Taro | | | | | | | | Variété : Igname | | | | | | | |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Volume alcool (ml) | 89 | 90 | 90 | 90 | 92 | 90 | 91 | Volume alcool (ml) | 90 | 90 | 90 | 90 | 92 | 90 | 90 |
| Degré (°GL) | 64 | 72 | 72 | 70 | 61 | 61 | 54 | Degré (°GL) | 63 | 70 | 70 | 70 | 59 | 60 | 53 |
| Numéro de jet | 8 | 9 | 10 | 10 | 11 | 13 | 14 | Numéro de jet | 8 | 9 | 10 | 10 | 11 | 13 | 14 |
| Volume alcool (ml) | 90 | 89 | 90 | 92 | 90 | 95 | 90 | Volume alcool (ml) | 89 | 89 | 90 | 90 | 90 | 95 | 90 |
| Degré (°GL) | 45 | 41 | 35 | 28 | 19 | 18 | 13 | Degré (°GL) | 44 | 39 | 34 | 32 | 23 | 18 | 12 |

Le volume total d'éthanol obtenu est de 1268 ml dont le degré alcoolique varie de 13° à 72° GL pour le Taro et de 1175 ml d'éthanol de 12° à 70°GL pour l'igname.

5.2.2. Deuxième série de distillation

Tableau 3 : Deuxième série de distillation

| Variété : Taro | | | | | | | | Variété : Igame | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Volume alcool (ml) | 90 | 92 | 94 | 90 | 92 | 92 | 92 | Volume alcool (ml) | 90 | 90 | 92 | 89 | 90 | 90 | 91 |
| Degré (°GL) | 71 | 71 | 71 | 67 | 65 | 60 | 55 | Degré (°GL) | 70 | 70 | 69 | 67 | 67 | 60 | 58 |
| Numéro de jet | 8 | 9 | 10 | 10 | 11 | 13 | 14 | Numéro de jet | 8 | 9 | 10 | 10 | 11 | 13 | 14 |
| Volume alcool (ml) | 91 | 99 | 99 | 92 | 92 | 105 | 88 | Volume alcool (ml) | 89 | 95 | 95 | 92 | 99 | 99 | 86 |
| Degré (°GL) | 54 | 47 | 40 | 40 | 28 | 24 | 14 | Degré (°GL) | 58 | 52 | 38 | 38 | 28 | 24 | 13 |

Le volume total d'éthanol obtenu est de 1403 ml dont le degré alcoolique varie de 10 à 71°GL pour le Taro tandis que pour l'igname, le volume d'alcool obtenu est de 1380 ml avec un degré alcoolique allant de 9° à 70°GL.

5.2.3. Troisième série de distillation

Tableau 4 : Troisième série de distillation

| Variété : Taro | | | | | | | | Variété : Igame | | | | | | | |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Volume alcool (ml) | 90 | 93 | 92 | 89 | 85 | 92 | 92 | Volume alcool (ml) | 90 | 91 | 93 | 90 | 89 | 90 | 90 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----|----|----|----|----|-----|----|----|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Degré (°GL) | 70 | 70 | 65 | 61 | 56 | 54 | 54 | | Degré (°GL) | 69 | 69 | 67 | 66 | 60 | 59 | 58 | |
| Numéro de jet | 8 | 9 | 10 | 10 | 11 | 13 | 14 | 15 | Numéro de jet | 8 | 9 | 10 | 10 | 11 | 13 | 14 | 15 |
| Volume alcool (ml) | 91 | 96 | 93 | 96 | 97 | 105 | 84 | 84 | Volume alcool (ml) | 90 | 94 | 92 | 95 | 94 | 95 | 82 | 81 |
| Degré (°GL) | 46 | 41 | 35 | 31 | 25 | 20 | 15 | 15 | Degré (°GL) | 49 | 48 | 45 | 43 | 20 | 18 | 13 | 13 |

Le volume total d'éthanol obtenu est de 1385 ml dont le degré alcoolique varie de 15 à 70°GL pour le Taro tandis que le volume d'alcool de l'igname est de 1356 ml de degré alcoolique de 13° à 69°GL.

5.2.4. Quatrième série de distillation

Tableau 5 : Quatrième série de distillation

| Variété : Taro | | | | | | | Variété : Igame | | | | | | |
|--------------------|----|----|----|-----|----|-----|--------------------|----|----|----|----|----|----|
| Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Volume alcool (ml) | 90 | 92 | 91 | 90 | 93 | 92 | Volume alcool (ml) | 89 | 90 | 90 | 90 | 89 | 91 |
| Degré (°GL) | 59 | 59 | 55 | 54 | 50 | 48 | Degré (°GL) | 54 | 54 | 54 | 53 | 53 | 46 |
| Numéro de jet | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Numéro de jet | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Volume alcool (ml) | 90 | 89 | 94 | 100 | 91 | 133 | Volume alcool (ml) | 90 | 88 | 90 | 96 | 91 | 98 |
| Degré (°GL) | 41 | 31 | 25 | 25 | 12 | 11 | Degré (°GL) | 40 | 29 | 24 | 18 | 16 | 10 |

Le volume total d'éthanol obtenu est de 1145 ml dont le degré alcoolique varie de 11 à 59°GL pour le Taro et de 1083 ml pour l'igname dont le degré alcoolique est de 10° à 54°GL.

5.2.5. Cinquième série de distillation

Tableau 6 : Cinquième série de distillation

| Variété : Taro | | | | | | Variété : Igame | | | | | |
|--------------------|----|----|----|----|----|--------------------|----|----|----|----|----|
| Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Numéro de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Volume alcool (ml) | 95 | 96 | 95 | 96 | 95 | Volume alcool (ml) | 93 | 94 | 96 | 98 | 94 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Degré (°GL) | 56 | 55 | 50 | 41 | 40 | | Degré (°GL) | 54 | 54 | 53 | 49 | 39 | |
| Numéro de jet | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Numéro de jet | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Volume alcool (ml) | 97 | 97 | 103 | 100 | 60 | 93 | Volume alcool (ml) | 93 | 94 | 98 | 97 | 89 | 95 |
| Degré (°GL) | 35 | 29 | 21 | 20 | 15 | 10 | Degré (°GL) | 34 | 25 | 24 | 18 | 12 | 9 |

Le volume total d'éthanol obtenu est de 1027 ml dont le degré alcoolique varie de 10 à 56°GL pour le Taro. Pour l'igname, le volume d'alcool obtenu est de 1041 ml avec un degré alcoolique de 9° à 54°GL.

5.3. Résultats des essais de la Rectification

Avant la rectification, nous avons rassemblé l'alcool obtenu par la première distillation en 4 groupes de degré alcoolique : 66° ; 51° ; 33° , 19° pour le cas du Taro

5.3.1. Premier groupe de rectification

Les conditions opératoires :

- Degré alcoolique 66 °GL
- Volume initiale de l'alcool 1,5L
- Température de consigne du régulateur de bouilleur (Θ_b) : 125°C puis 150°C
- Température de consigne du régulateur de la tête de colonne (Θ_{tc}) : 78°C

Tableau 7 : Première rectification

| Rubriques | Variété : Taro | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| N° de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Volume (ml) | 150 | 150 | 148 | 150 | 150 | 135 |
| Degré (°GL) | 92 | 91 | 90 | 88 | 86 | 85 |
| Durée (mn) | 50 | 34 | 43 | 40 | 21 | 25 |
| Θ_b (°C) | 127 | 129 | 127 | 157 | 151 | 158 |
| Θ_{tc} (°C) | 71 | 70 | 70 | 71 | 71 | 79 |

Le volume total d'éthanol obtenu est de 883 ml dont, les trois premiers distillats recueillis avec une température de consigne du bouilleur de 125°C présentent des degrés alcooliques variant de 90 à 92°, tandis que ceux des trois autres, opérés sous 150°C varient de 85 à 88°.

En outre, on remarque que la durée d'apparition du premier jet de la rectification faite à la température de consigne de 125°C est supérieure à celle sous 157°C (50 mn > 40 mn)

5.3.2. Deuxième groupe rectification

Les conditions opératoires :

- Degré alcoolique 51 °GL
- Volume initiale de l'alcool 1,5L
- Température de consigne du régulateur de bouilleur (Θ_b) : 125°C puis 150°C
- Température de consigne du régulateur de la tête de colonne (Θ_{tc}) : 78°C

Tableau 8 : Deuxième rectification

| Rubriques | Variété : Taro | | | | | |
|--------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| N de jet | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Volume (ml) | 150 | 150 | 140 | 150 | 130 | 146 |
| Degré (°GL) | 90 | 90 | 90 | 88 | 84 | 75 |
| Durée (mn) | 67 | 53 | 58 | 60 | 86 | 131 |
| Θ_b (°C) | 129 | 124 | 132 | 156 | 158 | 156 |
| Θ_{tc} (°C) | 78 | 70 | 79 | 72 | 79 | 72 |

Le volume total d'éthanol obtenu est de 866 ml dont, les degrés alcooliques des trois premiers distillats recueillis avec une température de consigne du bouilleur de 125°C restent constante 90° tandis que ceux des trois autres, opérés sous 150°C varient de 75 à 88°.

Comparé à la première rectification, on constate que plus le degré alcoolique du mélange initial est bas, plus le temps mis pour l'apparition du premier jet augmente.

5.3.3. Troisième groupe d'essai

Les conditions opératoires :

- Degré alcoolique 33 °GL
- Volume initiale de l'alcool 1,5L
- Température de consigne du régulateur de bouilleur (Θ_b) : 125°C
- Température de consigne du régulateur de la tête de colonne (Θ_{tc}) : 78°C

Tableau 9 : Troisième rectification

| Rubriques | Variété : Taro | | |
|--------------------|----------------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| N de jet | 1 | 2 | 3 |
| Volume (ml) | 150 | 150 | 100 |
| Degré (°GL) | 90 | 89 | 82 |
| Durée (mn) | 93 | 81 | 123 |
| Θ_b (°C) | 122 | 127 | 129 |
| Θ_{tc} (°C) | 76 | 79 | 79 |

Le volume d'alcool obtenu est de 400 ml dont le degré alcoolique est de 90 pour le premier jet tandis que les deux derniers jets varient de 82 à 89°.

5.3.4. Quatrième groupe d'essai

Les conditions opératoires :

- Degré alcoolique 19 °GL
- Volume initiale de l'alcool 2,345L
- Température de consigne du régulateur de bouilleur (Θ_b) : 125°C

– Température de consigne du régulateur de la tête de colonne (Θ_{tc}) : 78°C

Tableau 10 : Quatrième rectification

| Rubriques | Variété : Taro | | |
|--------------------|----------------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| N de jet | | | |
| Volume (ml) | 150 | 150 | 62 |
| Degré (°GL) | 88 | 80 | 69 |
| Durée (mn) | 147 | 112 | 220 |
| Θ_b (°C) | 122 | 126 | 128 |
| Θ_{tc} (°C) | 78 | 76 | 79 |

Le volume d'alcool obtenu est de 362 ml dont le degré alcoolique varie de 69 à 88.

Il est à noter que pour ces deux dernières rectifications (3^{ème} et 4^{ème}) nous avons fixé les températures de consigne respectivement à $\Theta_{tc} = 78^\circ\text{C}$ et $\Theta_b = 125^\circ\text{C}$. En effet, l'application de ces paramètres lors des deux premières rectifications a abouti à des résultats prometteurs, à savoir : degré alcoolique de distillat entre 90 à 92°.

6. Conclusion

L'objectif de ce travail de recherche consiste à produire du bioéthanol à partir des deux plantes amylacées provenant du District de Befandriana nord de la région Sofia. L'igname ou *oviala* en malgache, de l'espèce *alata*, de la famille *Dioscorea* et le taro ou *saonjo dia*, de la famille des *Aracées*. Ces deux plantes sont abondantes dans cette localité et sont utilisées seulement comme aliment de substitution en période de soudure. C'est dans ce contexte que le choix s'est focalisé à ces deux plantes pour la production de bioéthanol à cause de leur richesse en amidon et qu'elles répondent aux différents critères de production de bioéthanol.

Ce travail de recherche consiste à transformer les tubercules de l'igname et de taro en bioéthanol moyennant la technologie de l'hydrolyse enzymatique. La farine de tubercule est hydrolysée par des amylases issues des grains de paddy germés et fermentés par le biais de la levure *Saccharomyces cerevisiae* et puis distillés. Deux échantillons identiques de 8000 g de tubercules de taro et d'igname ont été transformés en bioéthanol dans les mêmes conditions au laboratoire du Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT). Les résultats ont montré que les paramètres optimums de la fermentation correspondent à un taux de levure de 5% et une durée de fermentation de 3 jours. Le taux d'atténuation du taro est plus significatif (62,50%) par rapport à celui de l'igname (56,25%). Du point de vue distillation, le volume d'éthanol obtenu est de 6228 ml pour le taro contre 6083 ml pour l'igname. Le degré alcoolique varie de 10° à 72°GL pour le taro et 9° à 70°GL pour l'igname. La rectification de 6228 ml d'éthanol a permis d'obtenir 2771 ml de bioéthanol dont 2149 ml de degré alcoolique variant de 82° à 92°GL, soit 77,55% et le reste soit 622 ml avec un degré alcoolique variant de 65° à 72°GL.

En perspectives, d'autres paramètres peuvent être étudiés pour améliorer la productivité en bioéthanol des plantes amylacées.

7. Références Bibliographique et webographie

- [1] GIRARDIN O., NINDJIN C., (1998), Technologie après récolte de l'igname : Etude de l'amélioration du stockage traditionnel, [in] BERTHAUD J., BRICAS N., MARCHAND J.L., Séminaire international CIRAD
- [2] DEGRAS L., (1986), L'igname : plante à tubercule tropicale .Paris : ACCT. Maison neuve et larose ; 408 p.
- [3].https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull53/3/53305711414_fr.pdf
- [4]. <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/taro-market>