

Année Universitaire 2013-2014



# RAPPORT DE STAGE

**Intitulé :**

**ETUDE COMPARATIVE DE LA PERFORMANCE DU  
RECHAUD A DIHYDROGENE ET DES RECHAUDS AUX  
COMBUSTIBLES MENAGERS USUELS.**

**Présenté par :**

**Monsieur Hajamalala Marcelin ANDRIANANTENAINA**

# SOMMAIRE

## Remerciements

## Liste des illustrations

1. Introduction .....	1
2. Objectifs scientifique et technique.....	2
3. Méthodologie.....	3
3.1. Étude théorique.....	3
3.2. Étude du système.....	3
3.2.1. Étude et conception du réchaud à alcool fonctionnant à l'éthanol 35-90°	3
3.2.1.1. Description du système étudié.....	4
3.2.1.2. Fonctionnement .....	4
3.2.2. Adaptation du réchaud à gaz du réchaud au bio-méthane(biogaz).....	4
3.2.3. Étude et conception du réchaud à dihydrogène et oxygène.....	5
4. Résultats obtenus.....	6
5. Problèmes rencontrés.....	7
<b>Conclusion.....</b>	<b>7</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>8</b>

## Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Physique Appliquée de l'Université de Fianarantsoa (LAPAUAF) dans le cadre de l'Accord de Coopération entre le PNUD et l'UNESCO et les Universités dans le Domaine de la Gouvernance et du Développement Humain Durable (G/DHD).

Tout d'abord, je tiens à remercier le PNUD et l'UNESCO qui ont joint leur efforts conformément à leurs mandats et leur stratégie pour appuyer les Universités à remplir ce rôle de sources de savoir, de savoir-faire et de nouvelles connaissances à travers la promotion de la Recherche pour en faire un levier de développement pour réduire la pauvreté, les inégalités et l'exclusion.

Ensuite, je tiens à remercier successivement ceux qui ont contribué à la réalisation de ce fameux projet de développement de la recherche à Madagascar, en particulier :

- le comité scientifique qui est chargé de sélectionner le dossier et d'assurer la validation finale des produits scientifiques des stagiaires.
- l'Université d'Antananarivo représentée par toute l'Équipe de G/DHD dirigée par Mr le VPFR pour l'appui financier. Cet appui m'a permis de préparer ma onzième publication dans la revue de notoriété internationale et d'avoir plus d'expérience en matière de la recherche et maîtrise de l'énergie alternative respectueuse de l'environnement.
- le responsable du laboratoire de physique Appliquée de l'université de Fianarantsoa de m'avoir accueilli dans son laboratoire de recherche en tant que stagiaire.

En conclusion, j'adresse mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, pour le soutien moral, matériel et financier.

# Liste des illustrations

## Figures

Figure 1 : Photo du FOYER VOAHAJA N°1(Photo CNRIT).....	4
Figure 2 : Électrolyseur conçu.....	5
Figure 3 : Flamme du dihydrogène.....	6

# 1. Introduction

A Madagascar, la couverture forestière constitue moins de 25% de la superficie totale de Madagascar; 80% de ses zones d'écosystème forestier naturel ont été perdus et 200 000 hectares de plus, selon les estimations, sont perdus par an. De récentes études montrent que si le taux de la réduction forestière reste au niveau actuel, toutes les forêts de Madagascar disparaîtront en 40 ans. Le secteur forestier représente 5% du PIB et 17% du secteur primaire. Dans la moyenne totale annuelle des revenus ménagers agricoles estimés à 240 USD, plus de 110 USD proviennent des produits forestiers, dont des produits non bois d'œuvre. En milieu rural, les activités relatives à la forêt fournissent la source première des revenus de rente, surtout à travers l'emploi, avec plus de 16 millions de jours de travail par an de rente. Cependant, les ressources forestières malagasy ont été, pendant plusieurs décennies en déclin. Les principales causes de la déforestation sont le défrichage pour l'agriculture, le bois de chauffe pour l'énergie ménagère et les feux de brousse. La croissance démographique, la continuation de la méthode du Tavy (agriculture sur brûlis), la dépendance des ménages par rapport au chauffage au bois en matière d'énergie, ainsi que les problèmes institutionnels et règlementaires afférents à la gouvernance forestière et aux droits fonciers contribuent également à la déforestation.

Selon les estimations, 95% des ménages à Madagascar dépendent de la biomasse d'origine forestière, en premier lieu du bois de chauffe et du charbon de bois pour leur énergie ménagère, avec une consommation nationale annuelle d'environ 9 millions de mètres cubes de bois de chauffage et de 8 millions de mètres cubes de bois en tant que charbon de bois. Le bois de chauffe est le combustible prédominant pour les quintiles les plus pauvres, les quintiles pauvres et les quintiles à revenu moyen, tandis que le charbon de bois prédomine pour les quintiles riches et les plus riches. L'électricité, le gaz naturel et le pétrole lampant ne fournissent de combustibles de cuisson que pour une très petite minorité, dont le gaz de pétrole liquéfié représentant 11% dans les principales villes, mais représentent une part négligeable ailleurs. L'éthanol est l'un de combustible très prometteur comparé aux autres combustibles. Mais, le coût de production de l'éthanol freine son utilisation domestique.

L'hydrogène est un vecteur d'énergie. La question de sa provenance est souvent soulevée. En fait, l'hydrogène peut être produit de différentes manières à partir de

différentes sources d'énergie, y compris les énergies fossiles, renouvelables et nucléaires. Certaines technologies sont déjà bien établies tandis que d'autres requièrent des recherches et des développements considérables. Étant donné que l'hydrogène peut être produit à partir d'un large éventail de sources primaires, il peut largement contribuer à l'amélioration de la sécurité de l'approvisionnement énergétique. Le recours à l'hydrogène comme vecteur énergétique propre est l'une des solutions pour répondre aux actuels défis énergétiques. Afin de produire ce carburant du futur, l'électrolyse de l'eau figure parmi les filières "écologiques" les plus prometteuses. Le coût de l'hydrogène produit localement par électrolyse est d'abord et avant tout lié à celui de l'électricité et à son mode de production. Dans le cas d'une électricité « verte », ce sont les coûts en capitaux du système renouvelable (photovoltaïque, éolien...) qui influenceront. Dans cette recherche, nous allons avant tout comparer la performance du système fonctionnant à l'hydrogène (Réchaud par exemple) afin de conclure la faisabilité technique, économique lors de son usage domestique.

## 2. Objectifs scientifique et technique

Ce projet s'inscrit dans le programme scientifique du GDH/D destiné à renforcer la collaboration entre le PNUD et l'UNESCO et les Universités. La thématique abordée dans ce projet a fait l'objet de travaux de **RECHERCHE SUR L'ÉNERGIE RENOUVELABLE**. Ce projet permettra au post-doctorant de préparer son Habilitation à Diriger des Recherches (**HDR**) pour assurer la relève du corps professoral.

Un des objectifs de ce projet de recherche est de contribuer à la réduction de la pollution générée par les combustions du bois et de la biomasse à une amélioration de la santé publique, de la protection de l'environnement. Il permettra également de lutter contre la déforestation massive à Madagascar.

La mission assignée à ce stage est :

- Établissement d'un modèle mathématique et informatique gouvernant le fonctionnement du système considéré.
- Expérimentation sur l'ensemble du système considéré.
- Établissement de code de calcul permettant d'étudier la performance des réchauds.
- Rédaction du rapport de stage de recherche et de l'article pour publication.

## **3. METHODOLOGIE**

### **3.1. ÉTUDE THÉORIQUE**

Nous avons étudié trois réchauds, à noter : un réchaud à alcool, un réchaud au biogaz et un réchaud à dihydrogène. Le réchaud à biogaz ressemble au réchaud à gaz classique. Notre étude se base sur le calcul de l'efficacité thermique des réchauds existants et celle du réchaud à dihydrogène.

L'étude théorique concerne l'établissement de modèle mathématique et informatique gouvernant le fonctionnement du système considéré. Pour étudier la performance de chaque réchaud, on a établi un code de calcul de l'efficacité thermique basé sur les données expérimentales relatives à chaque réchaud.

### **3.2. ÉTUDE DU SYSTÈME**

Le but de cette étude expérimentale repose sur les points suivants :

- Étude et conception de l'électrolyseur pour avoir les gaz dihydrogène et oxygène.
- Mise au point du réchaud à dihydrogène
- Mise en place du banc des mesures : étude expérimentale du fonctionnement du réchaud à dihydrogène.

Dans ce travail, nous avons conçu et étudié trois types de réchauds.

#### **3.2.1. Étude et conception du réchaud à alcool fonctionnant à l'éthanol**

**35-90°**

C'est un nouveau réchaud à éthanol constitué d'un brûleur à éthanol de faible degré alcoolique. La concentration en alcool éthylique est fixée à 45°.

.Dans cette étude, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Confection du réchaud.
- Divers essais techniques.
- Mesures expérimentales et calcul de l'efficacité thermique du réchaud.

### 3.2.1.1. Description du système étudié



Figure 1 : Photo du FOYER VOAHAJA N°1(Photo CNRIT)

### 3.2.1.2. Fonctionnement

L'alimentation du brûleur est assurée par un double réservoir relié entre eux par un tuyau galvanisé 21/27. Le premier réservoir de capacité 0,4 l est incorporé dans le brûleur tandis que le second de capacité 1,5 l est situé à l'extérieur de l'ensemble. L'écoulement de l'éthanol du réservoir s'effectue à partir de l'ouverture d'une vanne à eau 21/27 de faible pente.

Un tuyau de 8mm de diamètre incorporé dans le tuyau galvanisé reliant les deux réservoirs assure l'écoulement de l'éthanol du réservoir extérieur vers le brûleur.

### 3.2.2. Adaptation du réchaud à gaz du réchaud au bio-méthane (biogaz)

Concernant le réchaud à biogaz, il n'y a pas de modification significative sur l'adaptation. Le gaz provenant du biodigesteur est injecté directement dans les brûleurs. Nous avons suivi cette étape :

- Divers essais technique.
- Mesures expérimentales et calcul de l'efficacité thermique du réchaud.



### 3.2.3. Étude et conception du réchaud à dihydrogène et oxygène

L'électrolyseur utilisé dans cette étude est celui de « DRY CELL ELECTROLYZER » dont voici les étapes d'étude et de conception :

- Étude et conception de l'électrolyseur.
- Mise au point du réchaud à dihydrogène/oxygène
- Mise en place du banc des mesures : étude expérimentale du fonctionnement du réchaud à hydrogène.
- Établissement du code de calcul de l'efficacité thermique du réchaud.

La figure 2 montre le système de production de dihydrogène pure et d'oxygène pure (DRY CELL ELECTROLYZER).



Figure 2 : Electrolyseur conçu

La figure 3 montre la flamme du dihydrogène.



Figure 3 : Flamme du dihydrogène

Le dihydrogène est un gaz très inflammable. Par conséquent, nous avons mis au point un système permettant d'assurer la sécurité et d'éviter la détonation, l'explosion de ce gaz. Cela nous permet de déduire que l'utilisation du dihydrogène comme combustible domestique est intéressante pour les ménages à Madagascar.

Le protocole du test est présenté en annexe 1.

#### **4. RESULTATS OBTENUS**

Les résultats de cette étude concernent :

Pour l'éthanol :

- L'analyse de sécurité du FOYER (Annexe 2)
- Les tests d'ébullition d'eau.
- L'Évaluation de la Consommation
- L'Évolution de la température de l'eau et de la flamme en fonction du temps
- La Puissance du foyer
- L'Effizienz du foyer
- La teneur en CO et en CO<sub>2</sub> par litre d'eau bouillie

En général, la sécurité lors de l'utilisation des réchauds testés ne pose pas de problèmes. L'efficacité du foyer est inversement proportionnelle à la consommation énergétique du foyer et à la teneur en CO et CO<sub>2</sub>. Dans ce cas, la combustion de l'hydrogène produisant une flamme à haute température puissante est à la fois efficace à zéro émission de gaz à effet de serre.

## **5. Problèmes rencontrés**

- Le gaz découvert par électrolyse est très inflammable. L'adapter de la flamme au réchaud à gaz classique n'est pas évident.
- La maîtrise de la flamme qui durait plus de trois (03) mois rend difficile la mise au point du fonctionnement du réchaud.
- Quelques pièces pour brûleur sont introuvables sur le marché et il n'y a pas de vrais spécialistes pour le bricolage. L'adaptation exige plus de dépense.
- L'électricité pour l'électrolyseur est un problème à résoudre.

## **6. CONCLUSION**

Le financement de GDH/D nous a permis de réaliser un nouveau système fonctionnant au dihydrogène qui constitue un chemin vers l'autonomie énergétique de Madagascar car la combustion de ce gaz n'émet aucun gaz à effet de serre.

# ANNEXE 1

## *Le protocole du test* RECHAUD A ETHANOL

Le test comprend trois phases la phase de préparation ou avant cuisson, la phase de cuisson et l'après cuisson

### **Avant la cuisson**

Cette première phase consiste à effectuer diverses préparations des matières premières et diverses mesures relatives au test à réaliser entre autres :

- la mesure de la température de l'eau, de la température ambiante et de la vitesse du vent au laboratoire pour maintenir des conditions d'expérimentation comparables des foyers
- la préparation des solutions d'éthanol - les différents types de pesage des appareils de cuisson à tester et ses contenus (eau de 2500 g)
- les différents types de pesage d'alcools à introduire dans le réservoir.

### **Pendant la cuisson**

Cette phase de cuisson consiste à faire des mesures :

- d'élévation de température de l'eau dans l'équipement de cuisson,
- d'élévation de température du foyer sous la marmite à l'aide d'un thermocouple par lecture directe,

C'est dans cette partie aussi qu'on peut apprécier respectivement :

- le comportement du foyer par rapport à l'éthanol utilisé ;
- l'inflammabilité de l'éthanol par degré alcoolique ;
- l'état de la flamme (% en flamme bleue, % en flamme rouge)
- la température du corps extérieur du foyer

## Après le test

Cette partie correspond à entreprendre différentes pesées et mesures telles que

- le pesage des appareils de cuisson testés et ses contenus (eau)
- le pesage d'alcools restants dans le réservoir pour déterminer par différence la quantité réellement consommée pour l'ébullition plus 15 mn
- le dosage alcoolique des solutions d'alcool restant dans le réservoir.

### *Méthode de calcul pour la détermination de la puissance*

*Calcul de la puissance du foyer*

La puissance est définie comme étant la dérivée de l'énergie par rapport au temps

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt}$$

Pour notre cas, il s'agit de déterminer une valeur de puissance calorifique constante. On peut donc écrire ;

$$P = \frac{Q}{t}$$

Où : Q : représente l'énergie utile, c'est-à-dire l'énergie transmise par le foyer à la marmite,

et « t » : le temps ou la durée totale du test

L'énergie utile est fonction de la quantité de chaleur accumulée par l'eau entre sa température initiale et sa température d'ébullition et de la chaleur latente de l'eau évaporée :

$$Q = C_{\text{eau}} \times M_{\text{eau initiale}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{restante}})$$

Et par suite :

$$P = \frac{C_{\text{eau}} \times M_{\text{eau initiale}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{restante}})}{t}$$

Où :

$C_{\text{eau}}$	Chaleur massique de l'eau	4180 J/kg. °C
$L_{\text{eau}}$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	2260000 J/kg
$M_{\text{eau initiale}}$	Masse initiale de l'eau	kg
$M_{\text{eau restante}}$	Masse d'eau restante après le test	kg
$Q$	l'énergie transmise par le foyer à la marmite	Joule
$t$	Temps total du test	Seconde
$P$	Puissance du foyer	Watt

### *Calcul de l'efficience du foyer*

L'évaluation de l'efficience du foyer s'effectue à partir du calcul du rendement.

Par définition, le rendement c'est le rapport entre l'énergie transmise par le foyer à la marmite et l'énergie contenue dans le combustible brûlé.

Soit :

$$\eta = \frac{Q}{PC_{\text{Ethanol}} \times V_{\text{Ethanol}}}$$

Ou bien

$$\eta = \frac{C_{\text{eau}} \times M_{\text{eau initiale}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{restante}})}{PC_{\text{Ethanol}} \times V_{\text{Ethanol}}}$$

$PC_{\text{Ethanol}}$	Pouvoir calorifique moyen de l'Alcool	21300000 J/l
$V_{\text{Ethanol}}$	Volume de combustible brûlé	litre
$\eta$	Rendement du foyer	Pourcent (%)

### *Évaluation de la teneur en CO et en CO<sub>2</sub>*

Le monoxyde de carbone est émis quand la combustion est dite « incomplète » c'est-à-dire si le combustible ne réagit pas complètement avec l'oxygène de l'air pour produire du dioxyde de carbone (gaz carbonique) et de l'eau. Pour les hydrocarbures, la combustion incomplète est la plus fréquente. Elle se caractérise aussi par la production de résidus de combustion, de fumée, de l'émission de différents gaz imbrûlés et une couleur de flamme rouge ou jaune.

Avec l'éthanol, la probabilité d'une telle situation serait en principe moindre voire à l'état de trace qu'avec des combustibles fossiles, du bois ....

En effet, théoriquement, la combustion de l'éthanol ne produit que du gaz carbonique et de la vapeur d'eau, selon la formule :



Ethanol + oxygène => dioxyde de carbone + eau

Calcul du teneur en CO<sub>2</sub>



1mole = 46g

2moles=88g

1 litre éthanol =789g

34,30434783 moles

1litre d'éthanol produit donc 34,30 moles de CO<sub>2</sub>, soit 1509 g de CO<sub>2</sub>

## ANNEXE 2

### *Analyse de sécurité du FOYER VOAHAJA N°1*

**Notation :** 1 à 4 : 1 satisfaisant – 2 : moyen – 3 : bien – 4 : très bien

Tableau 1 : Analyse de sécurité du FOYER VOAHAJA N°1

<b>Rubriques</b>	<b>Notes : 1 à 4</b>	<b>Observation</b>
<b>Stabilité</b>	<b>1</b>	démontable (Réservoir et brûleur en deux parties)
<b>Ergonomie</b>	<b>3</b>	portabilité : simple car démontable non encombrant design : présentable
<b>Isolation</b>	<b>1</b>	sans système d'isolation risque de brûlure aux alentours du foyer
<b>Finition</b>	<b>2</b>	tuyauterie reliant brûleur et réservoir confectionné à partir de plomberie 21/27 (mamelon, vanne d'arrêt, té) surdimensionné par rapport à l'ensemble.
<b>Facilité de mise à feu</b>	<b>3</b>	facile avec amorçage à l'éthanol de plus de 70° avec utilisation d'un cylindre d'aspiration pour favoriser l'aspiration de l'éthanol
<b>Réglage de la puissance</b>	<b>1</b>	pas de réglage de débit (débit unique invariable)
<b>Facilité d'éteindre</b>	<b>3</b>	facile par le biais d'un clapet horizontal amovible juste à la partie supérieure du foyer (deux positions : ouvert, fermé)
<b>Capacité du réservoir une fois chargé</b>	<b>3</b>	1,500 l mais volume fonctionnel 1,350 l
<b>Praticabilité</b>	<b>4</b>	Chargeable à volonté (en continu), en pleine cuisson
<b>Durabilité</b>	<b>3</b>	construction en inox sauf couvercle du réservoir en plastique Durée de vie : 6 ans environ



## 7. REFERENCES

1. Ethanol as a Household Fuel in Madagascar, Preliminary Draft Report. Dated 5<sup>th</sup> February Practical Action Consulting, 2010, pp.8- 46.
2. Bailis, R., Ogle, D., MacCarty, N., Still, D., Edwards, R., and Smith, K. R., The Water boiling Test Version 3.0: Cook-stove Emissions and Efficiency in a Controlled Laboratory, Technical Report, University of California, Berkley, 2007.
3. Water boiling Test (WBT) data calculation sheet 3.0, Shell Foundation HEH Project, Berkley Air Monitoring Group, Berkley, 2007.
4. Arimah, B. C., and Ebohon, O. J., Energy transition and its implications for environmentally sustainable development in Africa. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2000, 7, pp. 201-216.
5. R omdhane Ben Slama., Essais sur la production de l'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau. 13èmes Journées Internationales De Thermique. Albi, France du 28 au 30 Août 2007