

Foyer Amélioré, Modèle Préservateur De Niveau 3 ,4 Et 5 Pour Une Cuisson Propre : Outil De Capture De Gaz A Effet De Serre, Des Particules PM10, PM2,5 Pour Un Développement Durable

[Improved Hearth, Level 3, 4 And 5 Preservative Model For Clean Cooking: A Tool For Capturing Greenhouse Gases And PM10, PM2.5 Particles For Sustainable Development]

¹ Tsilavozakaniaina Arivony RAINORO; ²RAZAFINDRAKOTO Tsilaozantsoa Nomena Fahasambarana; ³RAMAMONJISOA Mamitiana; ⁴RASOANAIVO Jean Luc; ⁵RAKOTOSON Rijalalaina; ⁶RAVONISON Elie

^{1.} EDSTII, Email : raininorotsilavo@gmail.com

^{2.} EDSTII, Email : nomenafahasambarana@gmail.com

^{3.} CNRIT, Email :mtr_mamitiana@yahoo.fr

^{4.} EDSTII, Email: jeanlucnj@gmail.com

^{5.} EDSTII, Email: rijalalaina.rakoto@gmail.com

^{6.} EDSTII, Email: ravonison.elie@gmail.com



Résumé: Cette étude aborde les défis du changement climatique et de la pollution domestique à Madagascar en développant des foyers améliorés de cuisson (niveaux 3, 4 et 5 selon la norme ISO 19867-1 :2018), combinant une combustion optimisée avec des systèmes de filtration des particules fines (PM10, PM2,5) et des gaz à effet de serre (CO₂). Les résultats démontrent que ces prototypes permettent une réduction significative des émissions polluantes (jusqu'à 75 % pour les PM10), une meilleure efficacité énergétique (rendement thermique accru de 30 à 50 %) et des économies substantielles de combustible (30-60 %). L'analyse révèle que ces solutions sont accessibles et culturellement adaptées aux ménages malgaches, tout en contribuant aux Objectifs de Développement Durable (ODD 3, 7 et 13). Les résultats expérimentaux confirment leur potentiel pour améliorer la qualité de l'air intérieur, réduire la pression sur les ressources forestières et offrir une alternative énergétique durable. Cette innovation technologique représente ainsi une réponse concrète aux enjeux sanitaires, environnementaux et énergétiques liés à la cuisson domestique à Madagascar.

Mots clés : Foyers améliorés modèle préservateurs, Cuisson propre, Pollution domestique, Particules fines, développement durable

Abstract: This study addresses the challenges of climate change and domestic pollution in Madagascar by developing improved cooking stoves (levels 3, 4 and 5 according to ISO 19867-1:2018), combining optimized combustion with filtration systems for fine particles (PM10, PM2.5) and greenhouse gases (CO₂). Results show that these prototypes deliver significant reductions in pollutant emissions (up to 75% for PM10), improved energy efficiency (thermal efficiency increased by 30-50%) and substantial fuel savings (30-60%). Analysis reveals that these solutions are accessible and culturally appropriate for Malagasy households, while contributing to the Sustainable Development Goals (SDGs 3, 7 and 13). Experimental results confirm their potential to improve indoor air quality, reduce pressure on

forest resources and offer a sustainable energy alternative. This technological innovation thus represents a concrete response to the health, environmental and energy issues associated with domestic cooking in Madagascar.

Key words: Improved stoves, preservative model, clean cooking, domestic pollution, fine particles, sustainable development.

1. Introduction

Depuis quelques années, le changement climatique se manifeste par des impacts observables. à travers la recrudescence des phénomènes météorologiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, les incendies, les sécheresses, les inondations, les tempêtes et les cyclones. Ces bouleversements altèrent les écosystèmes et modifient durablement les conditions climatiques à l'échelle mondiale. Face à cette situation, il est impératif de développer des solutions durables visant à réduire les émissions tout en améliorant l'efficacité énergétique et la qualité de vie de la population [1].

Dans ce contexte mondial marqué par une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et des particules fines PM 10 et PM_{2,5}, constitue un défi prioritaire pour atteindre les objectifs de développement durable (ODD). Ces polluants, majoritairement issus en grande partie des activités domestique et industrielle, ont des répercussions directes sur la santé humaine, la qualité de l'air et les écosystèmes. L'utilisation de foyers traditionnels pour la cuisson représente une source majeure de ces émissions, en particulier dans les régions où le recours au bois et au charbon de bois reste dominant [2].

Les foyers préservateurs de niveau 3, 4 et 5, conçus conformément aux standards internationaux, émergent comme des solutions technologiques prometteuses pour limiter ces impacts, outre leur efficacité énergétique accrue, intègrent des mécanismes avancés de réduction des polluants atmosphériques, en capturant les particules fines (PM₁₀, PM_{2,5}) et limitant les émissions de gaz à effet de serre. Au-delà de l'amélioration des conditions de vie des utilisateurs, ces technologies contribuent activement à la préservation de l'environnement et favorisent une transition vers des pratiques plus durables. Ce travail de recherche s'inscrit dans une démarche globale visant à étudier, concevoir et produire des foyers préservateurs performants pour une cuisson propre, intégrant des outils innovants de capture des particules fines et des gaz à effet de serre. L'objectif est de relever des défis à la fois techniques, environnementaux et sociaux en développant des solutions adaptées aux besoins des ménages, tout en respectant les principes du développement durable [2].

L'étude portera sur les aspects fondamentaux de la conception de ces foyers : optimisation des performances thermiques, intégration de systèmes de captation des polluants, évaluation de l'impact environnemental et ergonomique. Par ailleurs, une analyse approfondie de la faisabilité technique et socio-économique garantira une adoption à grande échelle, contribuant ainsi à la réduction de l'empreinte carbone et à l'amélioration de la qualité de vie de la population. Des questions se posent entre autres :

Le présent travail de recherches essaie de mettre en lumière les avantages et l'importance des foyers améliorés de modèle préservateur de niveaux 3,4 et 5.

2. Méthodologies

L'étude comprend des travaux de dessin technique des différents composants de chaque foyer préservateur avec leur accessoire respectif

Les modèles 2D et 3D depuis la figure 1 jusqu'à la figure 9 illustrent la conception des foyers améliorés de niveaux 3, 4 et 5.

2.1 Modèles 2D et 3D

La figure 1 présente les coupes des modèles 2D des foyers améliorés préservateurs de niveaux 3, 4 et 5

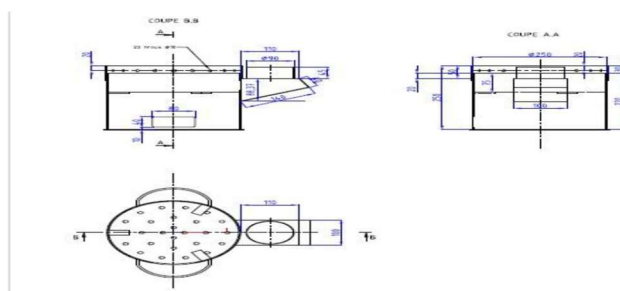


Figure 1 : Coupe et détails techniques du foyer préservateur modèles 2D de niveaux 3, 4 et 5

La figure 2 présente une coupe du foyer préservateur à cheminée avec cyclone

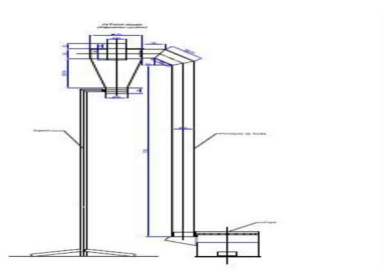


Figure 2 : Coupe du foyer préservateur à cheminée avec cyclone

La figure 3 montre le foyer à cheminée avec pot catalytique

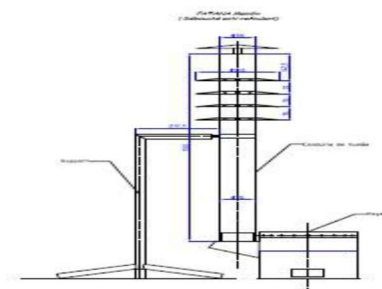


Figure 3 : Foyer à cheminée avec pot catalytique

La figure 4 montre le foyer à cheminée avec simple cheminée

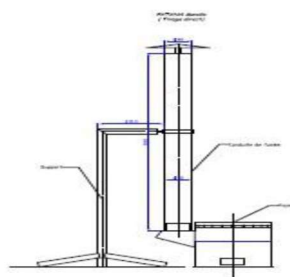


Figure 4 : foyer à cheminée avec simple cheminée

Après soudure et assemblage des différentes pièces métalliques, la figure 3D des foyers préservateurs se présente selon la figure 5.

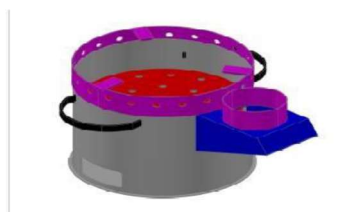


Figure 5 : foyer Amélioré sans cheminée

La figure 6 montre le Foyer préservateur niveau en 3D avec cheminée et à chambre de décantation de particule

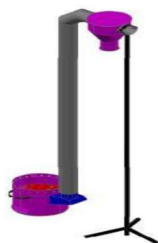


Figure 6 : Foyer préservateur niveau en 3D avec cheminée et à chambre de décantation de particule

La figure 7 montre le Foyer préservateur niveau en 3D avec adsorption de charbon actif

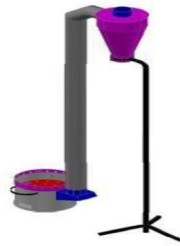


Figure 7 : Foyer préservateur niveau en 3D à charbon actif

La figure 8 montre le Foyer préservateur niveau en 3D avec filtre à cartouche

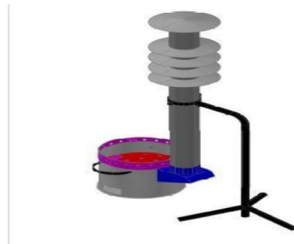


Figure 8 : Foyer préservateur niveau en 3D avec filtre à cartouche

La figure 9 montre le Foyer préservateur niveau en 3D avec Simple cheminée

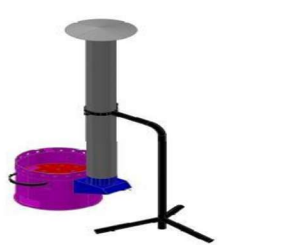


Figure 9 : Foyer préservateur niveau en 3D avec Simple cheminée

3.2. Confection et assemblage

La confection et l'assemblage doivent passer à travers les différentes étapes suivantes :

- L'achat des tôles ;
- Le traçage ;
- Le poinçonnage des tôles ;
- La coupe des tôles ;
- Le profilé ;
- La confection des chapeaux de la cheminée ;

- L'assemblage

3.3. Production de brique à base de fine de charbon de bois et analyses des caractères physico-chimiques des briques fabriquées

3.3.1. Production de briques à base de fine de charbon de bois

La production des briques suit les étapes suivantes : la carbonisation du bois d'eucalyptus pour obtenir du charbon de bois ; le broyage pour obtenir une fine poudre ; le Mélange qui consiste à mélanger la poudre de charbon avec un liant (fécule de manioc) et de l'eau dans les proportions suivantes : 100 g de liant pour 1 kg de matière et 1 litre d'eau pour 100 g de liant (ajusté à 1 litre pour 75 g de liant pour éviter les fissures). Après le mélange, il faut passer au compactage du mélange avec du compacteur ou presse pour avoir de la forme : que l'on veut : cylindrique, ou ovale. Enfin le séchage pour éliminer l'excès d'humidité.

Les photos 1 et 2 montrent quelques étapes de la production des briques



Photo 1 : Etapes de production de briques de fines de charbon de bois

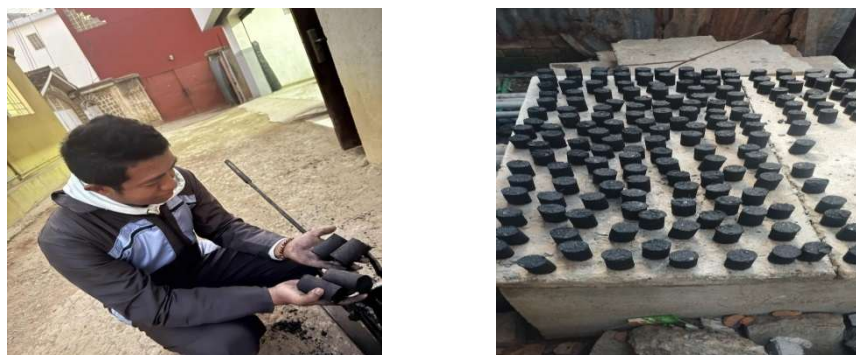


Photo 2 : Briques de fines de charbon de bois fabriquées

3.3.2. Détermination des caractères physico chimiques des briques

Un contrôle qualité a été réalisé au laboratoire du CNRIT (Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques). Pour avoir une bonne qualité de charbon vert, il faut tenir compte des paramètres suivants : Le taux d'humidité ; Le taux de cendres ; L'indice des matières volatiles ; le pouvoir calorifique Inférieur ou PCI.

a) le Taux d'humidité

Le taux d'humidité correspond à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air par rapport à la quantité maximale qu'il peut contenir à une température donnée.

Le principe est le suivant :

Séchage à 105°C 3°C d'une prise d'essai pendant 1h à 1h 30 dans une étuve à air chaud.

Calcul de l'humidité à partir de la perte de masse par rapport à la masse initiale.

Expression des résultats de l'analyse du taux d'humidité

$$H = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

m₁ : masse du récipient vide et sec.

m₂ : masse du récipient + masse d'échantillon avant étuvage.

m₃ : masse du récipient + masse d'échantillon après étuvage et refroidissement. **b) Taux de cendres**

b) Analyse du taux de cendres

• Mode opératoire de l'analyse du taux de cendres

Calciner une nacelle de silice au four à 950°C pendant 20 min. Refroidir 30 min dans un dessiccateur et peser à 0.1 mg (m₁)

Peser dans la nacelle 1 à 2 g de l'échantillon à 0.1 mg près (m₂).

Répandre le charbon uniformément dans la nacelle

Placer la nacelle dans le four à moufle (la température initiale du four ne doit pas dépasser 300°C) et chauffer le four à une vitesse de 250 à 300°C par heure pour atteindre 950°C ± 20°C.

Maintenir la nacelle pendant 3h à cette température puis sortir et refroidir dans le dessiccateur.

Peser à 0.1 mg près (m₃).

Effectuer 2 déterminations pour chaque échantillon.

Expression des résultats de l'analyse du taux de cendres

La teneur en cendres exprimée en pourcentage en masse du combustible brut est donnée par la formule suivante :

$$Ce = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100$$

Avec :

m₁ : masse en gramme de la nacelle

m₂ : masse en gramme de la nacelle et du charbon

m₃ : masse en gramme de la nacelle et des cendres

c) Indice de matières volatiles

L'indice de matières volatiles est la perte de masse exprimée en pourcentage, obtenue dans des conditions normalisées, après pyrolyse du charbon chauffé à l'abri de l'air, abstraction faite de la perte de masse due à l'évaporation de l'eau de l'humidité.

- **Mode opératoire pour déterminer l'indice de matières volatiles**

-Chauffer au préalable dans un four à moufle, pendant 30 min à $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ un creuset en silice muni de son couvercle, le refroidir au dessiccateur et le peser à 0.1 mg près (m1).

-Introduire dans le creuset 2 à 3 g de l'échantillon, peser à 0.1 mg près (m2).

-Recouvrir le fond d'un deuxième creuset de silice de taille supérieure par une couche de 1cm de charbon de bois.

-Introduire le creuset contenant l'échantillon à analyser, muni de son couvercle dans le grand creuset de silice et remplir totalement de charbon de bois. Couvrir par le couvercle et placer l'ensemble dans le four à moufle à $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$.

-Laisser séjourner pendant 1 heure à cette température, refroidir le tout dans un dessiccateur puis sortir le creuset contenant l'échantillon, nettoyer l'extérieur avec un pinceau et peser à 0.1 mg près (m3).

-Effectuer 2 déterminations sur chaque échantillon.

Expression des résultats de l'indice de matières volatiles

L'indice de matières volatiles en pourcentage en masse de l'échantillon est égal à :

$$MV = 100 \times \frac{m2 - m3}{m2 - m1} - H$$

m2 = masse en gramme du creuset, du couvercle et de l'échantillon avant chauffage

m3 = masse en gramme du creuset, de son couvercle et de son contenu après chauffage.

H = humidité en pourcentage massique de l'échantillon analysé

d) Détermination de la teneur en carbone fixe

L'indice de carbone fixe est déterminé par différence comme suit :

$$CF = 100 - (H + MV + Ce)$$

Où :

- CF : carbone fixe
- H : humidité
- MV : matières volatiles
- Ce : cendres

e) Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est une notion fondamentale en énergie et en combustion. Il représente la quantité d'énergie thermique libérée lors de la combustion.

On distingue deux types de pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) c'est la quantité maximale d'énergie que l'on peut obtenir par la combustion complète d'un combustible, en supposant que la vapeur d'eau produite par la combustion se condense et libère sa chaleur latente ;

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) c'est la quantité d'énergie effectivement récupérable, en tenant compte du fait qu'une partie de la vapeur d'eau produite ne se condense pas et s'échappe avec les gaz de combustible.

Mais dans notre cas, on s'intéresse seulement au pouvoir calorifique inférieur. Le résultat est calculé à partir de la formule de CASSAN suivante :

$$PCI = (100 - Ce) \times 80$$

Avec :

PCI : pouvoir calorifique inférieur (en kcal/kg)

Ce : taux de cendres

Le PCI dépend alors du taux de cendres. Plus le taux de cendres est grand, plus le PCI est bas et inversement.

3.3.3. Tests d'efficience et d'efficacité énergétique des briquettes à base de fine de charbon de bois et biomasse compactée par rapport au bois énergie

c) Drop test des quatre combustibles solides

Ce test constitue une simulation des sollicitations subies par le combustible lors du transport et la manutention. Il met en relief une nette corrélation entre la teneur en liant et l'aptitude du combustible à résister à l'effritement.

Le drop test consiste à laisser tomber, à partir de plusieurs hauteurs, tous les combustibles et à déterminer le comportement de chacun d'eux suivant chaque hauteur selon l'ordre chronologique suivant : 0,50 m ; 1 m ; 1,50 m et 1,90 m.

3.3.4. Test d'Ébullition d'Eau (TEE) des briquettes à base de fine de charbon de bois, pellet etbriquelette extrudée de la société Biogasikara ainsi que la biomasse compactée de la société Global Green Energy

Ce test consiste à déterminer :

- La durée d'ébullition d'eau de 2,5 litres en utilisant comme combustible les quatre combustibles étudiés avec le charbon de bois,
- Le nombre de briquettes consommées pour l'ébullition d'eau.

La réalisation de chaque activité dépendra des matériels d'étude, des matières premières (4 combustibles solides) et de l'eau.

a) Protocole du test

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

d) Avant cuisson

Cette première phase consiste à effectuer diverses préparations des matières premières et diverses mesures relatives aux tests 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 combustibles pour le test ;
- Les différents types de pesage des appareils de cuisson à tester (Marmite N°34) et ses contenus (eau du robinet 2,5 litres) ;
- Les différents types de pesage de combustible à introduire dans le foyer amélioré (0,5 kg). Pendant cuisson

e) Après cuisson

Cette phase de cuisson consiste à faire des mesures d'élévation de température de l'eau dans l'équipement de cuisson (toutes les 5 minutes) et ceux du foyer sous la marmite à l'aide d'un thermocouple par lecture directe. C'est dans cette partie aussi que l'on peut apprécier respectivement le comportement de chaque combustible (4 combustibles solides), l'état de la flamme, la température extérieure du corps du foyer et l'émission de fumée.

3.3.5. Test de Cuisine Contrôlé (TCC) des 4 combustibles solides à tester

Le Test de Cuisine Contrôlée ou Test de Cuisson Contrôlée (TCC) consiste à déterminer le temps de cuisson idéale pour tout type de plat de cuisson par l'utilisation des 4 combustibles solides à tester et des matériels de cuisson (foyer amélioré ou non, bouilloire).

Plusieurs types de plats sont cuits pour tester, voire évaluer, la performance des quatre combustibles solides face au charbon de bois et au bois de chauffe. Ces tests ont permis non seulement de comparer la durée de cuisson par type d'aliment ou de mets et par type de brique, mais aussi la qualité de cuisson, c'est-à-dire la qualité des plats cuits afin de choisir le bon combustible utilisé. Voici le protocole expérimental.

f) Protocole expérimental

Le TCC a été réalisé sur deux types d'aliments :

- Haricots secs
- Riz
- Balance de précision (pour peser les ingrédients et le combustible).
- Chronomètre (pour mesurer le temps de cuisson).

3.3.6. Détermination de la consommation en combustible ; évaluations de la puissance et de l'efficacité énergétique du foyer pour chaque type de combustibles

a) Détermination de la consommation en combustible (en kg/h)

La consommation moyenne en combustible sera déterminée à partir des valeurs moyennes issues des tests d'ébullition d'eau effectués à haute puissance.

La formule utilisée pour calculer la consommation moyenne en combustible sera la suivante :

$$\text{Consommation moyenne en combustible} = \frac{\text{Combustible consommé}}{\text{Durée de la combustion}}$$

Où :

$$\text{Combustible consommé} = \text{Combustible initial} - \text{Imbrulé (2)}$$

$$\text{Durée de la combustion} = \text{Durée d'ébullition de l'eau} + 14 \text{ heure (3)}$$

La consommation moyenne en combustible [kg/h] est donc égale à la valeur du rapport entre la moyenne de la quantité du combustible consommé [kg] avec celle de la durée d'ébullition d'eau plus ¼ heure [h].

3.3.7. Évaluation de la puissance

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

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt} \quad (4)$$

Pour notre cas, il s'agit de déterminer une valeur de puissance calorifique constante, qui peut donc s'écrire :

$$P = \frac{Q}{t} \quad (5)$$

Où Q : Energie utile, c'est-à-dire l'énergie transmise par le foyer à la marmite t : Temps ou durée totale du test

P : Puissance calorifique constante

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.

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

Et par suite :

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

Où C_{eau} : Chaleur massique de l'eau : 4180 [J/kg. °C]

L_{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]

$T_{\text{ébullition}}$: Température d'ébullition [°C]

T_{finale} : Température finale [°C]

Q : Energie transmise par le foyer à la marmite [J] t : Temps total du test [s] P : Puissance du foyer [W]

3.3.8. Évaluation de l'efficacité énergétique

L'évaluation de l'efficacité 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.

$$\eta = \frac{Q}{P_{\text{combustible}} \times P_{\text{combustible}}}$$

Ou bien :

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

Avec $P_{\text{combustible}}$: Pouvoir calorifique du combustible (Charbon de bois), soit : PC CHB

[Kcal/kg]

$P_{\text{combustible}}$: Poids du combustible consommé (Charbon de bois), soit : P CHB [kg] η : Rendement du foyer [%].

3.4. Les combustibles solides testés au laboratoire du CNRIT

Quatre types de combustibles solides ont été testés au laboratoire du CNRIT, pour déterminer leurs caractères physico chimiques respectif tels que :

- La brique combustible extrudée fabriquée à partir de sciure de bois de la société Biogasikara Energy de Moramanga ;
- Le pellet de sciure de bois de la société Biogasikara Energy de Moramanga
- La biomasse compactée de la société Global Green Energy d'Antananarivo.

- La brique combustible à base de fine de charbon d'eucalyptus fabriquée au laboratoire du CNRIT.

Les photos 3 à 5 montrent ces différents combustibles



Photo 3 : Briquette extrudée et pellet de la société Biogasikara à Moramanga



Photo 4 : Briquette à base de fine de charbon



Photo 5 : Biomasse compactée Global Green Energy

3.5. Essais et capture du gaz à effet de serre avec les foyers préservateurs

Les essais de capture des gaz à effet de serre (GES) ont été réalisés avec les équipements suivants :

3.5.1. Foyers préservateurs de niveaux 3, 4 et 5 conçus pour l'étude.

- Combustibles solides testés :
 - Briquettes à base de fine de charbon de bois.
 - Briquettes extrudées et pellets de la société Biogasikara.
 - Biomasse compactée de la société Global Green Energy.

3.5.2. Filtres à fibres métalliques.

Des filtres à fibre métallique ont été fabriqués et qui seront couplés avec du charbon actif produit à partir de la carbonisation de l'endocarpe de noix de coco.

Le dispositif est une combinaison de : fibres métalliques + charbon actif

3.5.2.1. Préparation de filtre des gaz à effets de serre conçue à partir de fibre métallique plus charbon actif de noix de coco

La conception du filtre pour capturer les GES a suivi les étapes suivantes :

- Préparation du charbon actif : Carbonisation de l'endocarpe de noix de coco à 600°C pendant 2 heures.
- Broyage et tamisage pour obtenir une granulométrie homogène (0,5 à 4 mm).
- Conception du filtre à fibres métalliques : Utilisation de fibres d'acier inoxydable (diamètre 10–100 µm).
- Assemblage en couches pour maximiser la surface de contact.
- Combinaison des matériaux : Intégration du charbon actif et des fibres métalliques dans un boîtier métallique.
- Disposition en trois couches : pré filtration (laine céramique), fibres métalliques catalytiques, charbon actif pour adsorption.

Durant cette phase de préparation, ces équipements de cuisson devront être prêts tels que :

- La marmite Ambatolampy N°34 ;
- L'eau du robinet de la JIRAMA ;
- L'équipement de mesure de volume de contenance : 1 ou 2 litres ;
- Le chronomètre pour mesurer la durée de l'expérimentation
- La balance de précision pour mesurer le poids du charbon actif, le poids des combustibles solides à tester ;

3.5.2.2. Installation dans la cheminée

- Placement du filtre à mi-hauteur de la cheminée (0,4 à 1,2 m du foyer) pour éviter la condensation.
- Fixation avec une trappe amovible pour faciliter l'entretien.

a) Charbon actif de noix de coco

- Granulométrie : 0,5 à 4 mm (pour un bon équilibre entre surface active et perte de charge).
- Surface spécifique (BET) : 800 à 1200 m²/g.
- Teneur en carbone fixe : >85%.
- Microporosité : dominante, idéale pour l'adsorption du CO₂.
- Température de fonctionnement : 20–60 °C (au-delà, la désorption est favorisée).

b) Fibres métalliques (acier inoxydable ou nickel par exemple)

- Rôle : catalyseur (pour la réduction de N₂O ou CH₄) ou support thermique.
- Diamètre des fibres : 10 à 100 µm.
- Température supportée : jusqu'à 800 °C.
- Fonction catalytique : dopage possible avec métaux (Cu, Ni, Fe, Mn) pour activer les réactions chimiques (ex. : oxydation ou réduction).

c) Efficacité estimée

Tableau 1 : Efficacité du filtre

Gaz ciblé	Mécanisme principal	Rendement estimé
CO ₂	Adsorption (charbon)	20–50%*
CH ₄	Oxydation catalytique	30–70%
N ₂ O	Réduction catalytique	40–80%
COV	Adsorption	>80%

-Phase d'essais à vide

Cette phase consiste à déterminer l'émission de gaz à effet de serre de chaque combustible sans utiliser la cheminée. Cette phase d'essai à vide est importante car c'est la phase de référence par rapport aux différentes expérimentations à réaliser.

•



Photo 6 : Les 4 essais à vide des 4 types de combustibles solides

-Protocoles

- Combustion de 500 g de chaque combustible dans le foyer préservateur sans cheminée.
- Mesure des GES (CO, CO₂, HC, NO_x) toutes les 5 minutes pendant 1 heure.
- - o Enregistrement des températures et des particules PM₁₀.

Les tests à vide ont permis d'évaluer les émissions de base des combustibles sans système de filtration.

3.6. Expérimentations

Cette phase d'expérimentation consiste à faire des essais de cuisson avec les quatre combustibles solides à tester. C'est à partir de ces expérimentations qu'on peut juger sur le comportement de chaque combustible sur l'émission de gaz à effet de serre, sur leur consommation en combustible et sur leur efficacité énergétique et écologique par rapport au bois énergie.

Les expérimentations avec filtres ont été menées pour évaluer l'efficacité de captation :

Le protocole est le suivant

- Utilisation du foyer préservateur équipé de la cheminée et du filtre combiné.
- Répétition des tests de combustion avec les mêmes combustibles.
- Mesure comparative des GES et des PM₁₀ avant et après filtration.

4. Résultats et Discussions

4.4.1. Résultats des essais avec les foyers préservateurs par type de combustibles étudiés

4.4.1.1 Pellet Biogasikara

Durant les essais d'expérimentation, on a pu constater l'évolution de HC (en ppm) et celle du gaz carbonique (CO₂) et du Monoxyde de Carbone (CO)

Le tableau 2 récapitule les résultats obtenus avec l'essai à vide avec le pellet

Tableau 2 : Résultats de capture de GES lors de l'essai à vide du pellet biogasikara

Essai	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6
HC (ppm)	41	67	75	72	78	78
CO (%)	0,14	0,25	0,30	0,25	0,29	0,28
CO ₂ (%)	1,3	1,7	1,7	1,6	1,7	1,2

4.4.1.2. Briquette extrudée Biogasikara

Durant les essais d'expérimentation, on a pu constater l'évolution de HC (en ppm) et celle du gaz carbonique (CO₂) et du Monoxyde de Carbone (CO)

Le tableau 3 récapitule les résultats obtenus avec l'essai à vide avec briquette biogasikara

Tableau 3: Résultats de capture de GES lors de l'essai à vide de briquette biogasikara

Essai	N°1	N°2	N°3
HC (ppm)	62	63	58
CO (%)	0,16	0,15	0,14
CO ₂ (%)	2,2	1,6	1,9

4.4.1.3. Briquette de fine de charbon de bois

Durant les essais d'expérimentation, on a pu constater l'évolution de HC (en ppm) et celle du gaz carbonique (CO₂) et du Monoxyde de Carbone (CO)

Le tableau 4 récapitule les résultats obtenus avec l'essai à vide avec briquette de fine de charbon de bois

Tableau 4: Résultats de capture de GES lors de l'essai à vide de briquette de fine de charbon de bois

Essai	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6
HC (ppm)	61	68	73	65	58	59
CO (%)	0,15	0,22	0,26	0,26	0,24	0,27
CO ₂ (%)	1,6	1,9	2,1	2	2	2,1

4.4.1.4. Biomasse compactée de Global Green Energy

Durant les essais d'expérimentation, on a pu constater l'évolution de HC (en ppm) et celle du gaz carbonique (CO₂) et du Monoxyde de Carbone (CO)

Le tableau 5 récapitule les résultats obtenus avec l'essai à vide avec Biomasse compactée de Global Green Energy

Tableau 5: Résultats de capture de GES lors de l'essai à vide de Biomasse compactée de Global Green Energy

Essai	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6
HC (ppm)	66	66	63	80	81	91
CO (%)	0,16	0,17	0,15	0,24	0,24	0,27
CO ₂ (%)	1,5	1,4	1,1	1,7	1,7	1,8

4.4.2. Résultat des essais avec introduction de filtre métallique avec fibre et charbon actif dans la cheminée par type de combustible étudié

4.4.2.1. Pellet Biogasikara

Durant les essais d'expérimentation, on a pu constater l'évolution de HC (en ppm) et celle du gaz carbonique (CO₂) et du Monoxyde de Carbone (CO) .

Le tableau 6 récapitule les résultats obtenus avec l'essai avec filtre avec le pellet

Tableau 6 : Résultats de capture de GES lors de l'essai avec filtre du pellet biogasikara

Essai	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6
HC (ppm)	31	57	65	62	68	68
CO (%)	0,04	0,05	0,20	0,15	0,19	0,18
CO ₂ (%)	0,3	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6

Ce résultat montre une réduction des émissions de HC de CO et de Gaz carbonique par rapport à l'essai à vide, ce qui justifie l'efficacité du filtre.

4.4.2.2. Briquette extrudée Biogasikara

Durant les essais d'expérimentation, on a pu constater l'évolution de HC (en ppm) et celle du gaz carbonique (CO₂) et du Monoxyde de Carbone (CO)

Le tableau 7 récapitule les résultats obtenus avec l'essai avec filtre avec briquette biogasikara

Tableau 7:Résultats de capture de GES lors de l'essai avec filtre de briquette biogasikara.

Essai	N°1	N°2	N°3
HC (ppm)	52	53	48
CO (%)	0,06	0,05	0,04
CO ₂ (%)	1,2	0,6	0,9

Ce résultat montre une réduction des émissions de HC de CO et de Gaz carbonique par rapport à l'essai à vide, ce qui justifie l'efficacité du filtre.

4.4.2.3. Briquette de fine de charbon de bois

Durant les essais d'expérimentation, on a pu constater l'évolution de HC (en ppm) et celle du gaz carbonique (CO₂) et du Monoxyde de Carbone (CO)

Le tableau 8 récapitule les résultats obtenus avec l'essai avec filtre avec briquette de fine de charbon de bois

Tableau 8 : Résultats de capture ou non de GES lors de l'essai avec filtre de briquette de fine de charbon de bois

Essai	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6
HC (ppm)	51	58	63	55	48	49
CO (%)	0,05	0,12	0,16	0,16	0,14	0,17
CO ₂ (%)	0,6	0,9	1,1	1	1	1,1

Ce résultat montre une réduction des émissions de HC de CO et de Gaz carbonique par rapport à l'essai à vide, ce qui justifie l'efficacité du filtre.

4.4.2.4. Biomasse compactée de Global Green Energy

Durant les essais d'expérimentation, on a pu constater l'évolution de HC (en ppm) et celle du gaz carbonique (CO₂) et du Monoxyde de Carbone (CO)

Le tableau 9 récapitule les résultats obtenus avec l'essai avec filtre avec Biomasse compactée de Global Green Energy

Tableau 9: Résultats de capture de GES lors de l'essai avec filtre de Biomasse compactée de Global Green Energy

Essai	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6
HC (ppm)	56	56	53	70	71	81
CO (%)	0,06	0,07	0,05	0,14	0,14	0,17
CO ₂ (%)	0,5	0,4	0,1	0,7	0,7	0,8

Ce résultat montre une réduction des émissions de HC de CO et de Gaz carbonique par rapport à l'essai à vide ; ce qui justifie l'efficacité du filtre.

4.5. Application du foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3, 4 et 5 pour la cuisson du thé, du repas de midi et du plat de résistance

4.5.1. Etude de l'émission des particules PM10 avec le foyer sans cheminée pour la cuisson du thé, du repas de midi et du plat de résistance en utilisant le bois de chauffe

Afin de réduire les méfaits de l'utilisation du bois de chauffe sur la santé humaine en cuisine et sur l'environnement en générale par le biais de l'émission de Gaz à effet de serre (GES), des essais de mesure des particules (PM10) ont été réalisés pour la cuisson de trois types d'aliments : cuisson de thé, cuisson de repas de midi et cuisson d'aliments de résistance. Pour chaque type d'aliments, trois essais différents ont été effectués pour trois jours successifs pour la cuisson de thé et du repas de midi. Par contre, pour la cuisson d'aliment de résistance, la cuisson a été réalisée pour trois jours mais séparément. Les trois tableaux 10, 11 et 12 illustrent l'émission de particules PM10 lors de ces essais.

Ces essais de cuisson ont été effectués dans une cuisine de dimension : 3mx 3, 5 m x3m. La durée de cuisson par type d'aliment n'est pas pareille. La durée est de 20 mn pour le thé, 120 mn pour la cuisson de repas de midi et 180 mn pour le plat de résistance.

Tableau 10 : Essais de cuisson avec le bois de chauffe au foyer sans cheminée

	cuisson thé			cuisson repas midi			cuisson plat de résistance		
Essais Journaliers	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
Taux de PM10 en 24 h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	350	355	358	879	1034	2500	3700	4037	4231

Ce tableau montre que plus la durée de cuisson augmente, plus l'émission de PM10 est importante pour l'utilisation de foyer sans cheminée. Cette situation est un risque pour la santé de la famille surtout pour les enfants.

Le graphe de la figure 10 confirme cette situation

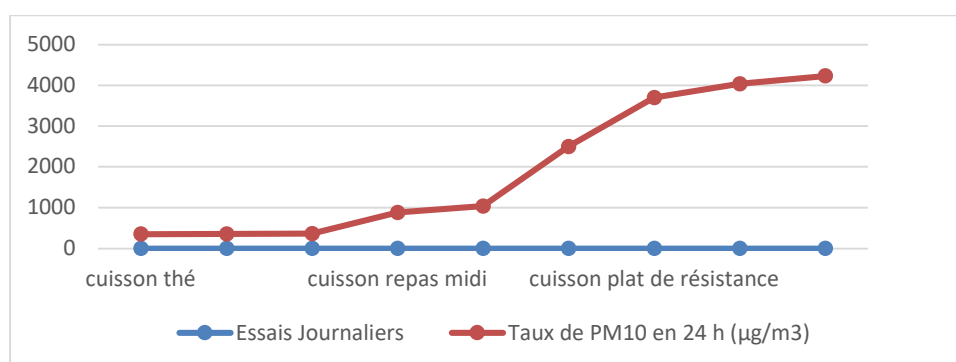


Figure 10 : Evolution du taux de PM10 pour la cuisson de thé, du repas de midi et du plat de résistance avec le bois de chauffe en utilisant le foyer amélioré sans cheminée

4.5.2. Etude de l'efficacité du foyer amélioré modèle préservateur niveaux 3,4 et 5 pour la cuisson du thé, du repas de midi et du plat de résistance avec le bois de chauffe

Les essais de cuisson sont les mêmes que précédemment mais cette fois, on a utilisé le foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3 4 et 5 avec cheminée. Le tableau 11 récapitule les résultats des essais d'expérimentation avec le foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3, 4 et 5.

Tableau 11 : Essais de cuisson avec le bois de chauffe au foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3 4 et 5.

	cuisson thé			cuisson repas midi			cuisson plat de résistance		
Essais Journaliers	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
Taux de PM10 en 24 h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	116,7	118,3	119,3	293	344,6	834	1233	1346	1410

Ce tableau montre que plus la durée de cuisson augmente, plus l'émission de PM10 est importante mais pas importante que lors de l'utilisation de foyer amélioré sans cheminée. On a pu constater que l'émission de particules PM10 a été réduite d'un tiers (1/3) par rapport à l'essai utilisant le foyer amélioré sans cheminée. Le graphe de la figure 11 illustre cette situation.

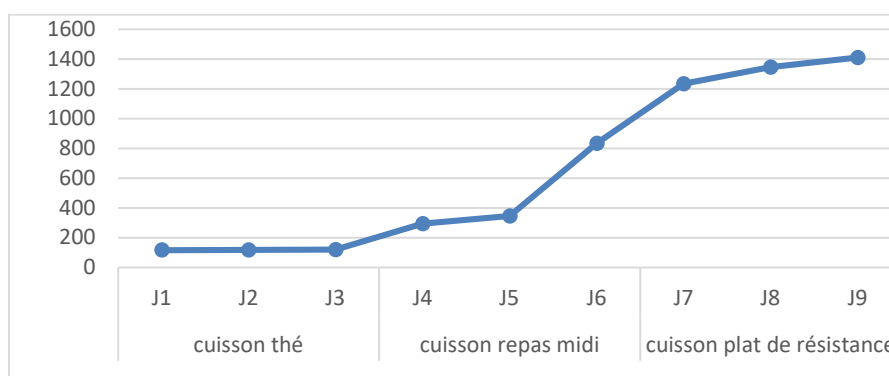


Figure 11 : Evolution du taux de PM10 pour la cuisson de thé, du repas de midi et du plat de résistance avec le foyer modèle préservateur de niveaux 3 4 et 5.

Ce graphe montre la faible pente dû à la faible émission de particules PM10 par rapport à la cuisson avec le foyer amélioré sans cheminée.

4.5.3. Etude de l'efficacité du foyer modèle préservateur de niveaux 3 4 et 5 pour la cuisson du thé, du repas de midi et du plat de résistance avec la briquelette extrudée de la société Biogasikara

Les essais d'expérimentation sont les mêmes mais ce qui le diffère des deux essais effectués antérieurement c'est que le combustible utilisé est la briquelette extrudée de Biogasikara et le foyer utilisé est le foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3 4 et 5. Le tableau 12 récapitule le résultat des essais d'expérimentation effectués.

Tableau 12 : Essais de cuisson avec la briquelette extrudée de Biogasikara au foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3 4 et 5.

	cuisson thé			cuisson repas midi			cuisson plat de résistance		
Essais Journaliers	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
Taux de PM10 en 24 h (µg/m3)	82	98	89	187	170,7	500	925	269,1	846,20

Ce tableau montre que plus la durée de cuisson augmente, plus l'émission de PM10 est importante mais plus faible par rapport à l'utilisation du bois de chauffe lors du premier et second essai. On a pu constater que l'émission de particules PM10 a été très réduite de presque un quart (1/4) par rapport à l'essai utilisant le foyer sans cheminée. Le graphe de la figure 12 illustre cette situation.

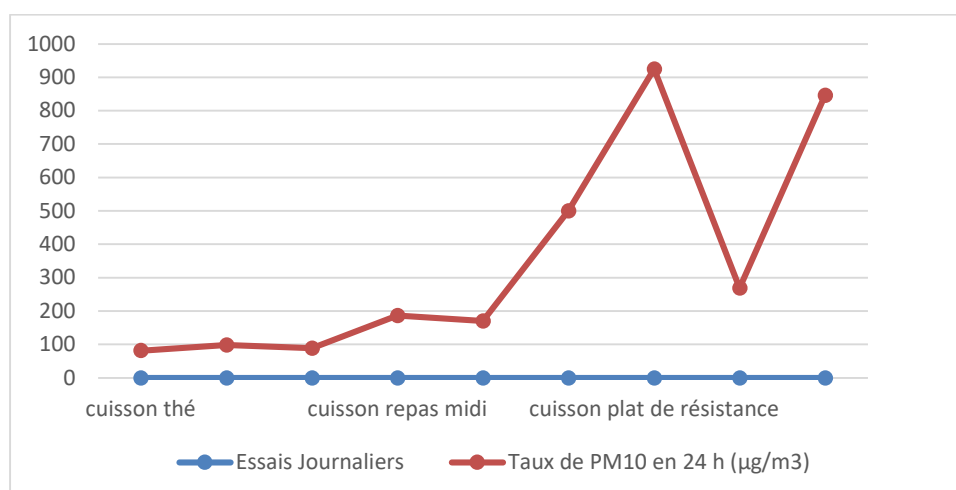


Figure 12 : Evolution du taux de PM10 pour la cuisson de thé, du repas de midi et du plat de résistance avec la briquelette extrudée de Biogasikara

4.5.4. Etude comparative de l'émission de particules (PM10) des trois essais de cuisson utilisant le bois de feu et la briquelette extrudée de Biogasikara avec le foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3 4 et 5 et le foyer sans cheminée

Le tableau 13 récapitule les résultats des trois essais de cuisson de thé, de repas de midi et de plat de résistance en utilisant le foyer sans cheminée et le foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3, 4 et 5 moyennant le bois de chauffe et la briquelette extrudée de Biogasikara pour la combustion.

Tableau 13 : Récapitulatif des trois essais de cuisson

	cuisson thé			cuisson repas midi			cuisson plat de résistance		
Essais Journaliers	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
Taux de PM10 en 24 h(sans cheminée)	350	355	358	879	1034	2500	3700	4037	4231
Taux de PM10 en 24 h (foyer préservateur)	116,7	118,3	119,3	293	344,67	834	1233,33	1346	1410
Taux de PM10 en 24 h (avec briquelette)	82	98	89	187	170,7	500	925	269,1	846,20

Ce tableau montre que l'utilisation en même temps le foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3, 4 et 5 et la briquelette briquelette extrudée de Biogasikara a réduit vers le quart (1/4) l'émission de particules PM10 dans la cuisine. Le graphe de la figure 13 illustre cette situation.

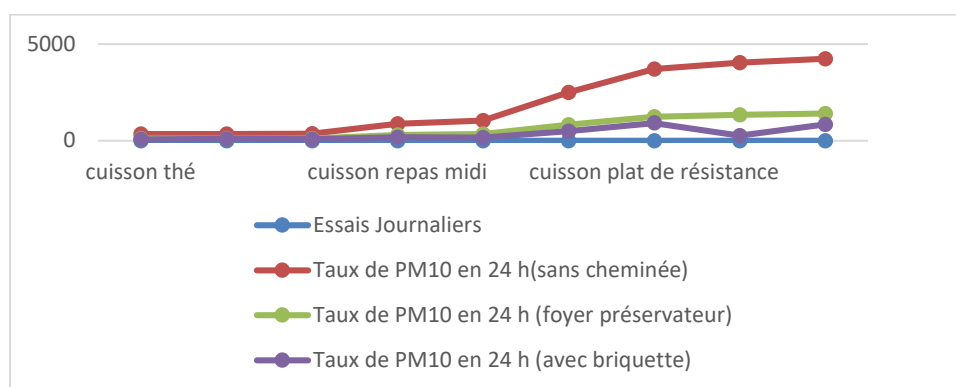


Figure 13 : Evolution du taux de PM10 pour les trois types de cuisson

En se référant sur les résultats de l'émission de particules PM10 en Afrique, en Asie et en Amérique Latine, le taux d'émissions de particules PM10 oscille entre 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour 24 heures, le résultat obtenu lors des essais d'expérimentation semble important si on n'utilise pas de foyer avec cheminée. Par contre l'utilisation de foyer amélioré modèle préservateur de niveaux 3, 4 et 5 avec intégration de filtre avec charbon actif, le taux d'émission de particule (PM10) est réduit d'un quart (1/4) par rapport à celui n'utilisant pas la cheminée.

En se référant avec les normes de l'Agence pour la Protection de l'Environnement des Etats Unis qui a fixé le seuil annuel moyen de PM10 de l'air extérieur à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et l'Union européenne a fixé comme limite un taux annuel moyen de PM10 de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, on peut dire la réduction de $\frac{1}{4}$ ce taux d'émission de particules PM10 est plus élevé presque deux fois avec celui de l'Union Européenne et 1,6 fois les normes américaines.

5. Conclusion

Force est de constater que les objectifs initiaux fixés sont atteints :primo, la détermination des caractères physico chimiques des quatre types de combustibles solides : pellet et brique extrudée biogasikara, brique de fine de charbon de bois et la biomasse compactée de la société Global Green Energy ; secundo, l'étude de l'efficacité énergétique de chaque combustible solide étudié, ce qui a permis de les classer selon leur performance énergétique dont la brique extrudée biogasikara qui tient la meilleure place par rapport au charbon de bois, au pellet et aux briques de fines de charbon de bois ; tertio, la réalisation des foyers préservateurs de niveaux 3, 4 et 5 est prometteur du point de vue amélioration sanitaire dans le ménage, de lutte contre le changement climatique et de réduction de la déforestation.

Les résultats des essais d'expérimentation sur le foyer préservateur ont permis de confirmer l'efficacité de ce foyer à cheminée par rapport aux autres foyers sans cheminée.

L'utilisation du bois comme combustible avec le foyer préservateur réduit d'un tiers (1/3) le volume d'émission des particules fines PM10 qui sont les sources de problème sanitaire ménager. Cette émission est réduite d'un quart (1/4) en utilisant le même foyer préservateur et la brique extrudée biogasikara comme combustible.

Il est à préciser que c'est grâce non seulement à la méthodologie adoptée qu'on a pu obtenir des résultats probants pour l'atteinte du développement durable dans ce travail de recherche mais aussi sur l'acquisition des différentes technologies développées et vécues au niveau des différents projets ponctuels développés dans le pays

Au terme de ce travail, l'application de ces résultats de recherche pourra apporter un plus à notre pays face à la déforestation aiguë, à la dégradation de la biodiversité et de l'environnement en général dans l'optique d'éviter la disparition des différentes espèces endémiques en flore et en faune qui classent Madagascar comme étant parmi les pays à hot spot, une prise de position devra être prise afin d'éviter la catastrophe environnementale dans le pays.

Référence

- [1]**Lumni**. Changement climatique : quelles conséquences ? [En ligne]. [Consulté le 15 juin 2025].
- [2]**Chafe ZA, Brauer M, et al.** Household cooking with solid fuels contributes to ambient PM_{2.5} air pollution and the burden of disease. *Environ Health Perspect.* 2015 ;123(12) :1319-30. [Consulté le 10 juin 2025]. DOI : 10.1289/ehp.1206340
- [3]**Madagascar**. Plan national d'Adaptation au Changement Climatique (PNA). Antananarivo : Gouvernement de Madagascar ; 2020. [Consulté le 15 juin 2025]
- [4]**Notre Voix**. *Foyers améliorés : une solution locale contre la déforestation* [En ligne]. [Consulté le 13 juin 2025]. Disponible sur : <https://notrevoix.info>
- [5]https://www.atmoauvergnerhonealpes.fr/sites/aura/files/content/migrated/atoms/files/note_benzo_a_pyrene_passy.pdf consulté le 200924
- [6]Nations Unies. Changement climatique [En ligne]. [Consulté le 14 juin 2025]. Disponible sur : <https://www.un.org/fr/climatechange>
- [7]OpenEdition Journals. Mise en oeuvre opérationnelle d'un projet de compensation carbone [En ligne]. [Consulté le 10 juin 2025]. Disponible sur : <https://journals.openedition.org>
- [8]Energypedia. Foyers en image [En ligne]. [Consulté le 16 juin 2025]. Disponible sur : <https://energypedia.info>
- [9]https://issuu.com/ldmev/docs/madagascar_yearbook_2021/s/12998991 consulté le 101024
- [10]<https://www.wwf.mg/?821111/Des-solutions-pour-une-filiere-bois-energie-durable-a-Madagascar> consulté le 101024
- [11]<https://www.unicef.fr/article/la-pollution-de-lair-a-lorigine-de-81-millions-de-deces-en-2021> consulté le 101024