

MODELISATION ET SIMULATION DE LA PERFORMANCE D'UN "FATANA MITSITSY" EN UTILISANT L'ARGILE ET LA SCIURE DE BOIS COMME MATERIAU ISOLANT

Julien RAJOMALAHY et Lala ANDRIANAIVO

Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Laboratoire Exergie & Géoingénierie, BP 1500
Antananarivo 101, Madagascar - julienrajomalahy@gmail.com, aandrianaivoo@gmail.com

Résumé

Cette étude a pour but d'évaluer les performances d'un "Fatana" de cuisson amélioré par l'utilisation de matériau isolant. Un prototype de fourneau isolé d'un diamètre de 26 cm a été conçu, construit et coulé avec de l'argile comme première couche et de la sciure de bois seule comme deuxième couche. Le système développé a été testé à l'aide d'un test d'ébullition de l'eau afin d'établir ses performances de fonctionnement. L'efficacité thermique du système a été évaluée en utilisant des combustibles indigènes utilisés dans les zones rurales de Manjakandriana (Madagascar). La dynamique des fluides numérique a été utilisée pour simuler les champs de température et de vitesse à l'intérieur de la chambre de combustion et pour générer les contours de température du "Fatana". Les résultats obtenus indiquent que le rendement thermique est plus élevé ($35,5 \pm 2,5\%$) par rapport aux systèmes traditionnels. La vitesse d'écoulement est restée constante, la chambre étant colorée en vert tout au long du processus en raison de l'isolation du poêle par de la sciure de bois. Le flux de chaleur généré a indiqué qu'une couche épaisse de 6 cm ou plus peut assurer une bonne isolation, et que celle-ci peut être encore réduite en introduisant davantage de sciure de bois. Le système conçu a le potentiel de réduire la consommation de charbon de bois et les émissions par rapport aux "Fatana" traditionnels.

Mots-clés : Charbon de bois/ Efficience énergétique/ Combustion/ flux d'air/ modélisation/ simulation numérique

1. INTRODUCTION

Dans les pays en développement comme Madagascar, la demande d'énergie provenant de la biomasse a augmenté en raison de la croissance exponentielle de la population. Cela s'est traduit par l'utilisation de quantités considérables de bois. La situation est exacerbée par l'utilisation populaire de fourneaux inefficaces à faible isolation thermique; ce qui contribue à la déforestation. Au moins 50 % des habitants du pays cuisinent en utilisant des combustibles solides (bois, résidus de récolte, charbon de bois et excréments d'animaux) dans des feux ouverts [1].

L'utilisation de feux ouverts pour la cuisine domestique consomme plus d'énergie que tout autre service d'utilisation finale dans les pays en développement [2]. Ces technologies de cuisson inefficaces sont également associées à des niveaux élevés de pollution de l'air domestique par toute une série de polluants toxiques, ainsi qu'à des comportements irrationnels de la part des ménages.

La sciure de bois est l'un des combustibles solides de la biomasse et des matériaux isolants qui peuvent être utilisés pour augmenter l'efficacité thermique des fourneaux [3]. Ces déchets proviennent principalement des scieries, des ateliers de menuiserie et du sciage en long. Dans la plupart des cas, la sciure n'est pas utilisée et est simplement jetée. Cela pose des problèmes d'élimination et, dans certains cas, la sciure est brûlée, ce qui entraîne une pollution de l'environnement.

Il est établi que l'incorporation d'une couche d'isolation dans la chambre de combustion des fourneaux minimise le transfert de chaleur vers les parois, ce qui se traduit en fin de compte par une température élevée dans la chambre de combustion, une amélioration de la combustion et une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

2. DIMENSIONNEMENT ET CONSTRUCTION DU POELE

2.1. Considérations relatives à la taille de la cuisinière

La taille de la casserole détermine les dimensions du fourneau. Une casserole en aluminium de 26 cm de diamètre et de 1,2 mm d'épaisseur a été choisie pour dimensionner le prototype de fourneau, tel qu'il est couramment utilisé par les ménages. La fonte et l'acier doux ont été choisis comme tôles essentielles pour la fabrication des composants du "Fatana Mitsisty". La première a été choisie en raison de sa résistance à la chaleur et de sa capacité à la dissiper rapidement. Une plaque de fonte de 1,2 mm d'épaisseur a été utilisée pour construire la chambre de combustion, le magasin à feu, le magasin à air et la jupe de la casserole. Une plaque d'acier doux (1,2 mm) a été utilisée pour construire la plaque inférieure, la plaque supérieure et les cylindres intérieur et extérieur du système. L'acier dur a été utilisé pour construire la grille en raison de sa nature résistante à la chaleur. La relation entre le diamètre de la casserole et la chambre de combustion a été prise en considération lors du dimensionnement du poêle (Figure 1).

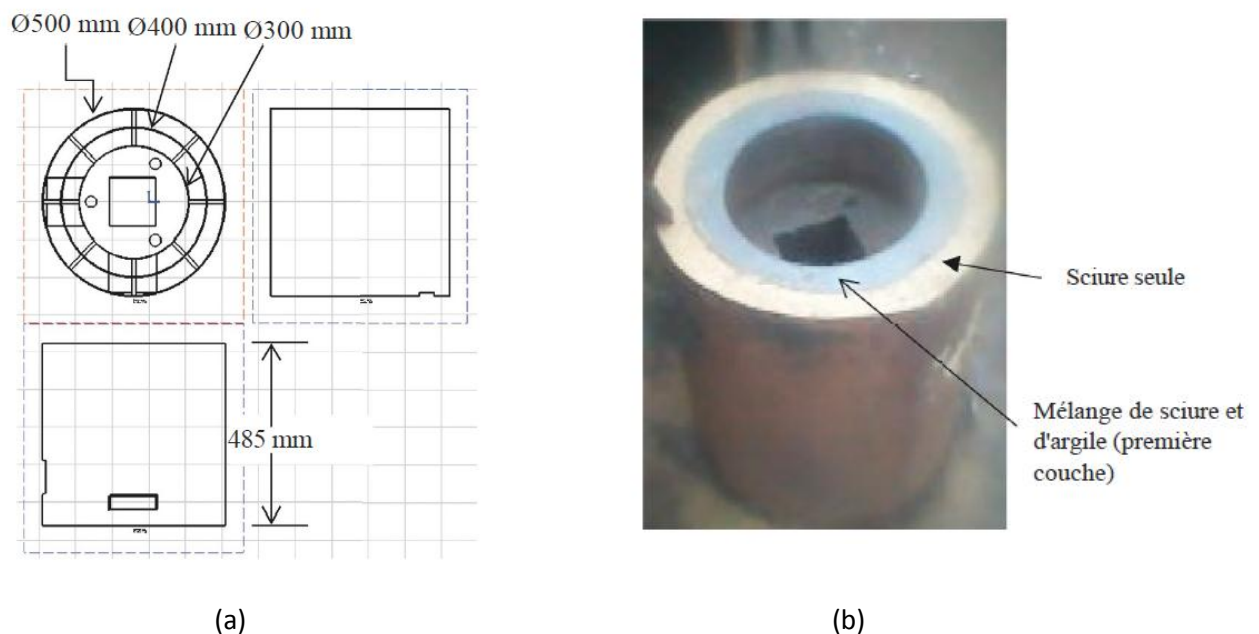


Figure 1: Composants du poêle proposé : (a) dessin (dimensions) et (b) impression artistique

2.2. Dimension du "Fatana"

Le dessin isométrique des différents composants du poêle a été réalisé à l'aide du logiciel ANSYS 16.0 sur la base d'une casserole de 26 cm de diamètre (Figures 2).

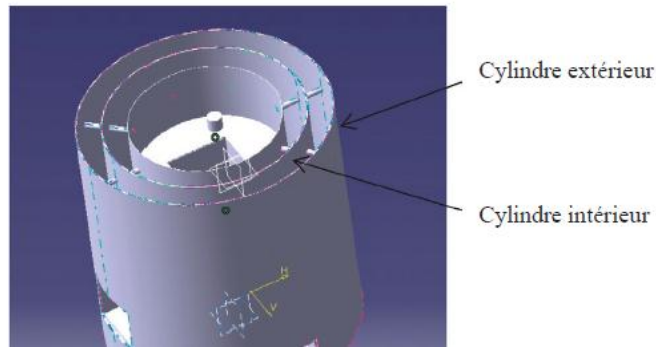


Figure 02 : Dessin 3D du système

Le cylindre intérieur a été obtenu en mesurant et en découpant une plaque d'acier doux de 1256 mm × 485 mm d'une épaisseur de 1,2 mm. La tôle obtenue a ensuite été pliée pour former un cylindre creux de 400 mm de diamètre pour un cylindre intérieur de 485 mm de hauteur. Le cylindre intérieur a ensuite été inséré et positionné concentriquement avec le revêtement intérieur, de sorte qu'il se trouve à 50 mm des parois du revêtement intérieur. Le cylindre extérieur a été obtenu en mesurant et en découpant une tôle d'acier doux de 1570 mm × 485 mm d'une épaisseur de 1,2 mm. La tôle découpée a été pliée pour former un cylindre extérieur de 500 mm de diamètre.

2.3. Construction du système

Deux morceaux de plaques de fonte en forme de L (130 mm × 130 mm) ont été soudés pour former un carré creux de 325 mm de hauteur pour la chambre de combustion. La base du revêtement intérieur a été fabriquée à l'aide d'une plaque de fonte de 300 mm de diamètre. Un carré creux de 130 mm × 130 mm a ensuite été découpé dans la plaque de 300 mm de diamètre, mesuré directement à partir du centre de la plaque, pour former la base de la chemise intérieure. Celle-ci a ensuite été soudée sur le dessus de la chambre de combustion. La jupe de la casserole a été fabriquée à partir d'une tôle en fonte de 942 mm × 120 mm × 1,2 mm. La partie de 942 mm a été pliée pour former une section creuse de 300 mm de diamètre, 120 mm de hauteur et 1,2 mm de diamètre.

La grille a été fabriquée en acier dur de 10 mm de diamètre. Elle a été fabriquée dans une forme carrée (120 mm × 120 mm) afin de s'adapter à la section creuse de la chambre de combustion. La plaque inférieure (500 mm de diamètre) a été fabriquée à partir d'une feuille d'acier doux de 1,2 mm d'épaisseur et soudée sur le fond.

3. MODELISATION ET SIMULATION

Le remplacement du processus de combustion par un flux d'air à l'aide du logiciel ANSYS, a permis de créer un modèle simple de dynamique des fluides numérique (CFD) pour le poêle à charbon de bois. En outre, la géométrie du prototype du poêle a été simplifiée sous une forme utilisable par l'ordinateur.

3.1. Teneur en eau du biocombustible

Ils ont été pesés à l'aide d'une balance analytique numérique calibrée Mettler PM200. Les échantillons ont été placés dans un four électrique à 105°C pendant 24 heures, puis pesés à nouveau. La teneur en humidité des combustibles de la biomasse a été déterminée sur une base humide et sèche (équations 1 et 2) [4].

$$MC_{wb} = \frac{MC_{db}}{1 + MC_{db}} \times 100, \quad (1)$$

$$MC_{db} = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100, \quad (2)$$

Où

MC_{db} : est la teneur en eau sur une base sèche (%)

MC_{wb} : est la teneur en eau sur une base humide (%),

M_i : est le poids initial du carburant (g),

M_f : est le poids final du carburant (g).

3.2. Détermination du pouvoir calorifique du combustible

Un calorimètre à bombe de cuivre a été utilisé pour déterminer le pouvoir calorifique des combustibles de biomasse utilisés. Une masse connue de combustible a été introduite dans le calorimètre et allumée pour chauffer 2 kg d'eau. Le combustible a été brûlé en présence d'oxygène jusqu'à ce qu'il soit complètement consommé. Le changement de température de l'eau a été lu à l'aide d'un thermomètre portatif et enregistré. Le pouvoir calorifique du combustible a été calculé à l'aide de l'équation (3). Et le pouvoir calorifique moyen a été utilisé pour la détermination du rendement thermique

$$C = \frac{M_w C_w (T_f - T_i) + M_c C_c (T_f - T_i)}{M_f}, \quad (3)$$

Où

M_w : The mass of water used (kg)

C_w : The specific heat capacity of water ($\text{kJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$)

C_c : The specific heat capacity of the calorimeter ($\text{kg}^{-1} \text{C}^{-1}$).

3.3. Détermination de l'épaisseur de la couche isolante du "Fatana"

Le flux thermique de la paroi du poêle a été généré. En utilisant la température maximale, l'épaisseur minimale de la couche d'isolation a été déterminée. Compte tenu de la température de la paroi et du flux de chaleur, l'épaisseur du mélange sciure-argile nécessaire pour obtenir une température ambiante sur la paroi extérieure de la couche d'isolation a été déterminée selon la loi de conduction de la chaleur (équation (4)).

$$Q = \frac{k \times (T_{\text{Hot}} - T_{\text{Ambient}})}{L}, \quad (4)$$

Où

Q : Flux de chaleur ($W m^{-2}$),

k : Conductivity thermique ($W m$),

L : Thickness of the insulation layer (cm)

T_{Hot} : The hot temperature (K),

$T_{Ambient}$: Ambient temperature (K).

3.4. Simulation numérique

3.4.1. Conditions limites du modèle du "Fatana"

Les conditions limites du modèle CFD ont été définies comme indiqué dans le Tableau 1. La conductivité thermique de l'argile, de la sciure de bois et de la sciure de bois dans l'argile utilisée est celle rapportée par Folaranmi [5].

Tableau 1 : Conditions limites du modèle

Boundary name	Boundary type	Boundary conditions
Case wall	Surface	Mild steel – $50W m^{-1} K^{-1}$
Clay	Wall	$0.25 W m^{-1} K^{-1}$
Sawdust-clay	Wall	$0.06 W m^{-1} K^{-1}$
Sawdust	Wall	$0.08 W m^{-1} K^{-1}$
Cold air inlet	Cold air	Temperature = $27^{\circ}C$ Air velocity = $0.05 m s^{-1}$

3.4.2. Maillage pour la simulation du "Fatana"

Les hypothèses et conditions limites ci-dessus ont été utilisées pour simuler le "Fatana" à l'aide de la version 16.00 d'ANSYS. Le maillage de la surface a été généré à l'aide de DesignModeler, Il a été utilisé pour initier le maillage afin de faire de petits triangles pour permettre à l'ordinateur d'analyser le résultat dans un format étudié.

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1. Test d'ébullition de l'eau

Le test d'ébullition de l'eau a été utilisé pour évaluer la performance thermique globale du poêle. Il s'est déroulé en trois phases : (1) faire bouillir de l'eau à froid, (2) faire bouillir de l'eau lorsque le poêle est chaud et (3) maintenir l'eau à des températures d'ébullition. Dans l'expérience, l'eau a été chauffée jusqu'au point d'ébullition. Le temps nécessaire pour faire bouillir une quantité donnée d'eau, la consommation spécifique de charbon de bois ainsi que l'évaluation de l'efficacité thermique à la fois pour un apport d'énergie élevé et faible ont été mesurés.

La modélisation de la dynamique des fluides a été réalisée pour visualiser les processus de combustion dans la chambre et pour montrer les contours de la température à travers la paroi du poêle. Cela a permis d'observer l'effet des isolants sur le poêle pendant son fonctionnement.

4.2. Profil et champ de température

Les contours de température du foyer généré sont illustrés à la Figure 3. Les zones de températures chaudes sont représentées par des couleurs orange et rouge, tandis que les températures froides sont ombrées en bleu et violet. Le réchaud est resté froid, de sorte que l'air chaud a été limité à la chambre de combustion, augmentant ainsi l'efficacité du transfert de chaleur vers la marmite.

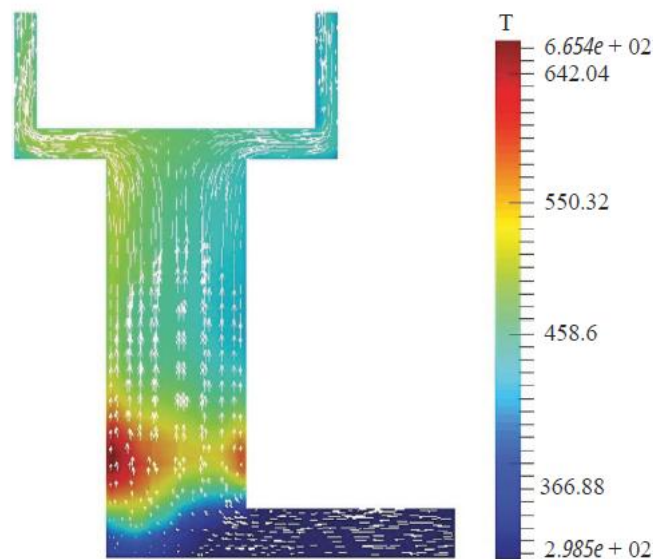


Figure 3: Contour de la température avec les vecteurs de vitesse.

Les tracés se sont stabilisés après 250 secondes. Les profils de température et de vitesse sont présentés dans les figures 3 et 4. Les champs de température et de vitesse du poêle ont été générés (figure 3). Le modèle a montré que la température peut être d'environ 600 K à l'intérieur, tandis que la température de la paroi peut augmenter jusqu'à 800 K et continuer à diminuer sur la paroi extérieure du poêle. Cela signifie que la couche d'argile et de sciure a permis une bonne isolation thermique du poêle grâce à une baisse de la température vers la paroi extérieure.

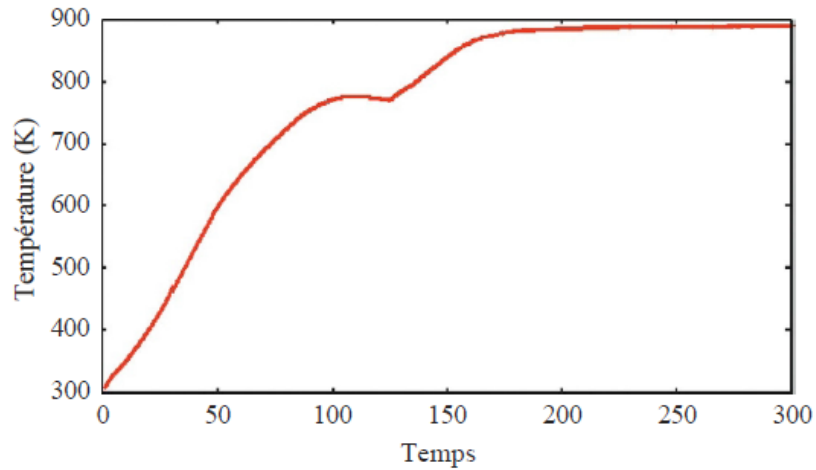


Figure 4: Profil de température à l'intérieur de la chambre de combustion.

Comme le montre la figure 4, la température à l'intérieur de la chambre de combustion a augmenté avec le temps, puis est restée constante à une température maximale de 900 K. La température à l'intérieur de la chambre de combustion a augmenté avec le temps et est restée constante.

4.3. Profil et champ de vitesse

La température à l'intérieur de la chambre de combustion du poêle peut être maintenue et, par conséquent, la chaleur peut être transférée à la marmite. La vitesse à l'intérieur de la chambre de combustion a diminué rapidement et est restée constante. Cela signifie que le flux d'air à l'intérieur de la chambre n'a pas été affecté par l'environnement extérieur puisqu'il a été contrôlé à l'intérieur de la chambre. Comme le montre la figure 5, les champs de vitesse à l'entrée basse de la chambre de combustion étaient 16 m s^{-1} avec une couleur rouge-orange.

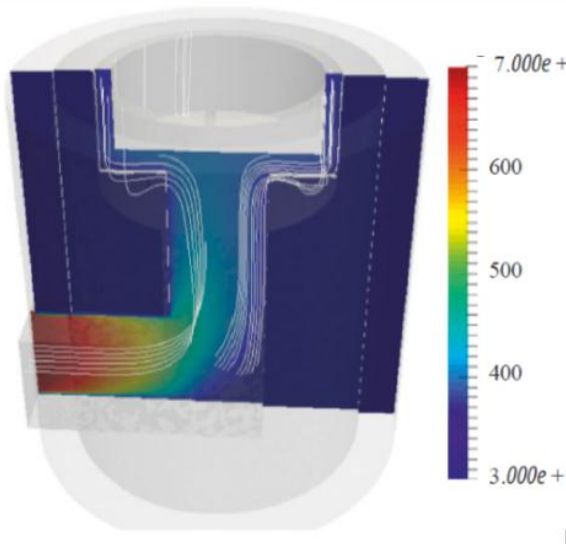


Figure 5: Champs de vitesse, lignes de courant de la vitesse colorées

Les gaz de combustion ont été répartis uniformément dans la chambre, ce qui a permis d'obtenir de bonnes performances de cuisson. L'augmentation de la température au niveau de la paroi jusqu'à 800 K est due au matériau en fonte qui est un bon conducteur thermique.

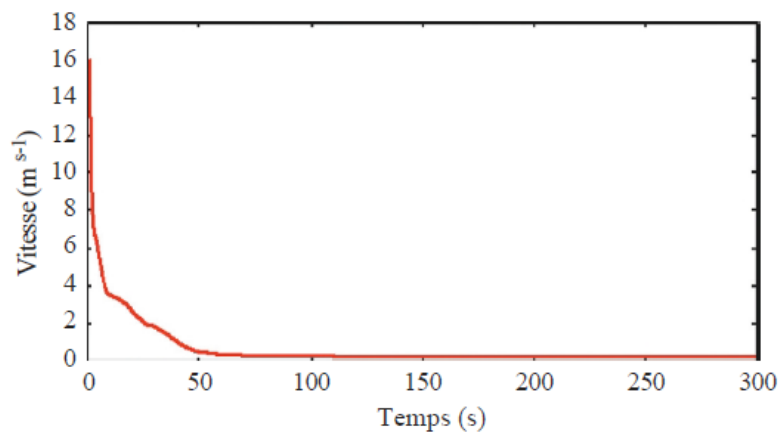


Figure 6: Profil de vitesse à l'intérieur de la chambre de combustion

Dans la Figure 6, la vitesse d'écoulement était la plus élevée à l'entrée de l'air et diminuait à l'intérieur de la chambre de combustion avec un débit presque constant puisqu'il était coloré en vert. Cela est dû au blindage de la chambre de combustion du poêle isolé qui réduit la vitesse d'écoulement par rapport aux poêles ouverts traditionnels. La vitesse d'écoulement était la plus faible à l'entrée du foyer, où la température de combustion était la plus élevée

4.4. Épaisseur minimale de la couche d'isolation

Après génération du flux de chaleur, la valeur négative signifie que le flux de chaleur a quitté le domaine du fluide. La valeur minimale était de -540 W m^{-2} alors que la valeur maximale était de 1027 W m^{-2}

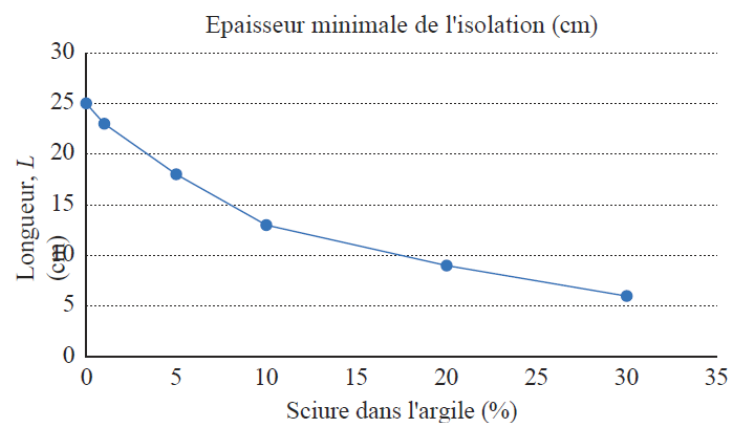


Figure 7 : Influence de la sciure de bois sur l'épaisseur de l'isolation

Le flux de chaleur a été réparti dans toute la chambre de combustion. Compte tenu de la conductivité thermique, $k = 0,06 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pour 30 % de sciure de bois dans l'argile (Figure 7), en prenant $Q = 600 \text{ W m}^{-2}$ pour être prudent, l'épaisseur minimale de la couche d'isolation était de 6 cm (calculée par substitution dans l'équation (4)).

Par conséquent, une épaisseur inférieure à 6 cm garantissait une bonne isolation du poêle. L'épaisseur de la couche d'isolation peut être réduite à 6 cm tout en maintenant la chaleur dans la chambre de combustion. L'épaisseur peut être réduite en ayant plus de sciure car l'augmentation du pourcentage de sciure réduit la conductivité thermique (Figure 7). Avec plus de sciure, l'épaisseur pourrait donc être inférieure à 6 cm.

4.5. Efficacité thermique du "Fatana" à charbon de bois.

Nous avons fait une simulation simplifiée d'un processus de cuisson typique qui mesure l'efficacité avec laquelle un poêle utilise le combustible pour chauffer l'eau dans une marmite et la quantité d'émissions produites. Le WBT comporte trois phases séquentielles : la phase de démarrage à froid à puissance élevée, la phase de démarrage à chaud à puissance élevée et la phase de mijotage. La mesure des performances de la cuisinière à la fois à haute et à basse puissance (phase de mijotage) simule ce qui est susceptible de se produire lors de la cuisson d'aliments qui impliquent l'ébullition et le mijotage. Ce type de cuisson est le plus courant. Le rendement thermique obtenu en utilisant le charbon de bois est indiqué dans le tableau 2. Le rendement thermique le plus élevé est de 30 % à la phase de mijotage.

Tableau 2 : Rendement thermique (%) du poêle à charbon de bois

	Cold start	Hot start	Simmer
Biomass fuel	35.5 ± 2.5	35.0 ± 2.6	23.8 ± 1.2

5. DISCUSSION

Les tests ont été menés conformément aux normes des volontaires de l'assistance technique de plusieurs élèves. Les paramètres mesurés pendant les essais du poêle comprenaient la masse de combustible utilisée, la température de l'air ambiant, le temps de démarrage, le temps de fonctionnement, la température de l'eau et la masse de cendre produite à la fin de l'essai. La température de l'air ambiant a été enregistrée dans chaque expérience à l'aide d'un thermomètre d'une précision de 1°C. Le temps d'allumage du poêle pour chaque combustible a été mesuré à l'aide d'un chronomètre avec une précision de 1 seconde. Cette mesure visait à déterminer la facilité avec laquelle le combustible s'allume. Le temps de fonctionnement du combustible dans le poêle a été mesuré à l'aide d'un chronomètre avec une précision d'une seconde. Cette mesure a permis de simuler la cuisson d'aliments à l'aide du prototype. La température de l'eau a été enregistrée toutes les 2 minutes.

La consommation spécifique de combustible, telle que définie par notre étude, est le combustible nécessaire pour produire une unité de rendement. Elle mesure la quantité de combustible nécessaire pour produire un litre (ou un kilogramme) d'eau bouillante. La consommation est de 108 g L⁻¹. Il y avait des différences significatives dans la consommation des combustibles lorsqu'ils étaient utilisés dans le poêle conçu ($P < 0,01$). La consommation est inversement proportionnelle à la densité apparente du combustible, c'est-à-dire que plus la densité apparente du combustible de biomasse est élevée, plus la consommation n'est faible et vice versa. Une consommation plus faible permet une cuisson plus propre et plus rapide.

L'efficacité thermique était statistiquement significative ($P < 0,001$). L'efficacité énergétique a un effet sur la performance des combustibles dans le "Fatana" pendant l'ébullition. La densité apparente des

combustibles a influencé leur taux de combustion. Les combustibles plus denses ayant des taux de combustion plus faibles ont rapporté que l'efficacité thermique des poêles blindés peut être améliorée.

6. CONCLUSION

Il a été constaté que l'utilisation du fourneau amélioré réduisait la consommation de charbon de 61 % par rapport aux fourneaux traditionnels. Les économies estimées grâce à l'utilisation du poêle conçu avec les combustibles solides de déchets de biomasse et le charbon de bois comprenaient une réduction de 18 % du temps de cuisson.

La dynamique des fluides computationnelles a indiqué que la chaleur était concentrée à l'intérieur de la chambre de combustion en raison de l'isolation parfaite du poêle avec de la sciure de bois alors que les températures diminuaient vers la paroi du poêle. Le flux de chaleur généré indique que l'épaisseur de la couche d'isolation du poêle peut être de 6 cm ou moins et que le poêle reste chaud.

Les performances (efficacité thermique) et les émissions des fourneaux à biomasse sont dictées par divers facteurs tels que le type de fourneau (conception), les pratiques d'alimentation en combustible, l'éclairage et la température de combustion. L'utilisation durable de la biomasse et l'amélioration de l'efficacité thermique des fourneaux peuvent être obtenues par l'utilisation de bons matériaux isolants, de combustibles propres ou par l'adoption de signes uniques qui facilitent la combustion du combustible.

La construction et le test d'un prototype de cuisinière isolée d'un diamètre de casserole de 26 cm ont été effectués, et la cuisinière a été étudiée à l'aide d'un logiciel de dynamique des fluides computationnelles (ANSYS). Un test d'ébullition de l'eau a été réalisé pour mesurer les performances globales d'un réchaud utilisant le charbon de bois. D'autres études devraient se concentrer sur la réduction de l'épaisseur de la (première) couche d'argile et de sciure et sur l'augmentation de l'épaisseur de la couche de sciure afin de réduire le poids du poêle à bois.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Rianala, S. Dama, R. Razakarivelo; "Study and fabrication on heat efficient stove of low smoke emission for Madagascar," *Environment International*, vol. 103, pp. 73–90, 2019.
- [2] E. Getahun, D. Tessema, and N. Gabbiye, "Design and development of household gasifier cooking stoves: natural versus forced draft," in *Advances of Science and Technology. ICAST 2018*, F. Zimale, T. Enku Nigussie, and S. Fanta, Eds., Vol. 274, Springer, Cham, Switzerland, 2019
- [3] H. B. Darlami, B. B. Ale, and G. R. Pokharel, "Experimental analysis of thermal efficiency of mud improved cookstove with variation of different parameters and economic analysis," *Journal of the Institute of Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 385–392, 2019.
- [4] W. R. Odogola and R. Henriksson, "Post harvest management and storage of maize," in *Technical Systems for Agriculture, UNDP/OPS Regional Programme on Agricultural Operations Technology for Small Holders in East and Southern Africa*, pp. 27–48, 1991.
- [5] J. Folaranmi, "Effect of sawdust additive on the properties of clay," *AU Journal of Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 53–56, 2009