

Pertes Thermiques Convectives Du Système Foyer À Charbon De Bois—Ustensile De Cuisine : Analyse Des Facteurs D'influence, Cas De Madagascar

[Convective Heat Losses In The Charcoal Stove–Cookware System: Analysis Of Influencing Factors, Case Of Madagascar]

Ambinindrazany Lahinirina Thierry¹, Ralibera Andriamifidy Gérard², Andrianaivoravelona Jaconnet Oliva³

¹Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Université d'Antananarivo, Madagascar
email : ambinindrazany@gmail.com

²Département Énergétique, Centre Nationale de Recherches Industrielle et Technologique, 38, rue Rasamimanana, Fiadanana, Antananarivo 101, Madagascar.
email : raliberandriamifidy@gmail.com

³Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Campus de Vontovorona, BP 1500, Antananarivo 101, Madagascar.
email : jaconnetoliva@gmail.com

Auteur correspondant : Ambinindrazany Lahinirina Thierry. E-mail : ambinindrazany@gmail.com



Résumé — La modélisation des pertes de flux thermiques par convection des foyers à charbon de bois, lors de la cuisson, permet de mettre en place des stratégies pour les réduire. Ces pertes sont, d'une manière générale, en corrélation avec la masse de charbon de bois en combustion, le diamètre du foyer à charbon de bois utilisé et les dimensions du récipient de cuisson. La masse de charbon de bois en combustion ne doit pas dépasser une certaine valeur pour un meilleur rendement foyer-ustensile. Des résultats théoriques sont ainsi mis en avant dans ce travail au niveau des dimensions du récipient de cuisson et du foyer pour que l'utilisation de ce dernier soit optimale. Le diamètre du foyer à charbon de bois doit être inférieur à celui du récipient de cuisson pour un rendement thermique élevé. Aussi, le flux thermique perdu est sensible au rapport entre l'écart vertical entre foyer à charbon de bois et le récipient de cuisson. Des points de balise, où le rapport entre l'écart vertical entre foyer à charbon de bois et le récipient de cuisson est maximal et optimal pour ne pas détériorer d'autant plus le rendement thermique, ont été modélisés. Un abaque est alors proposé en ce sens. La hauteur du récipient de cuisson, en corrélation avec le rayon de ce dernier, est aussi étudiée dans ce document pour déterminer son effet sur la perte de flux thermique. Globalement, plus la hauteur du récipient est importante, plus le flux thermique perdu est inversement moindre.

Mots clés : charbon de bois, foyer à charbon de bois, modélisation, Flux thermique, Madagascar

Abstract — Modeling of convective heat flow losses from charcoal stoves during cooking made it possible to develop strategies to reduce them. These losses are generally correlated with the mass of burning charcoal, the diameter of the charcoal stove used, and the dimensions of the cookware. The mass of burning charcoal should not exceed a certain value to achieve better stove-to-cookware efficiency. Theoretical results are also highlighted in this document regarding the dimensions of the cookware and the charcoal stove so that the latter can be used optimally. The diameter of the charcoal stove should be smaller than the cookware to obtain high thermal efficiency. In addition, the lost heat flow is sensitive to the ratio defined by the vertical gap between the charcoal stove and the cookware. Benchmark points, where this vertical-gap ratio is maximal and optimal so as not to further degrade thermal efficiency, were modeled. A chart is therefore proposed for this purpose. The height of the cookware in relation to its radius is also studied in this document to determine its effect on heat flow loss. Overall, the greater the vessel height, the lower the convective heat flow losses.

Key words: charcoal, charcoal stove, modeling, heat flow, Madagascar

I. INTRODUCTION

Les foyers à charbon de bois restent le principal moyen de cuisson pour la préparation des repas à Madagascar. Le bois y reste le principal source d'énergie thermique pour la cuisson à hauteur de 78 % en 2019 [2]. Environ 8 millions de m³ de charbon de bois y est consommés en 2015 pour une utilisation domestique au sein des ménages Malgache [2]. Ce dernier est quasiment utilisé quotidiennement au sein de la majorité des ménages Malgache [1][2]. Ce dernier constitue un centre de dépense assez important et incontournable pour les ménages Malgache. D'où l'importance de maîtriser l'utilisation de ce dernier pour minimiser son impact économique et environnemental. Cependant, plusieurs pertes thermiques apparaissent et diminuent fortement le rendement thermique du foyer à charbon de bois. Il y a des pertes thermiques par conduction et rayonnement au niveau des parois du foyer, mais aussi des pertes par convection de la sortie du foyer. Le transfert thermique vers l'ustensile utile à la cuisson en elle-même est essentiellement convectif et par rayonnement. En revanche, l'essentiel de la littérature et des études déjà réalisées sont focalisés autour des pertes thermiques par conduction et rayonnement [5][6]. En l'occurrence, ces études ont abouti à l'apparition des foyers à charbon de bois améliorés, comme l'utilisation de foyer en argile. C'est dès lors d'une importance cruciale d'en déterminer les pertes thermiques par convection apparaissant au niveau du couple foyer-ustensile et d'analyser les facteurs influant. Cet article essaye de modéliser, avec une approche théorique, les modes de perte thermique par convection au niveau du foyer à charbon de bois et de l'ustensile de cuisine ; et de déterminer, par la même occasion, la configuration optimale pour minimiser ces pertes et d'améliorer encore plus le rendement thermique de ce dernier.

II. METHODOLOGIE

Plusieurs types de foyers à charbon de bois existent à travers Madagascar, que ce soit de section circulaire ou carrée, métallique, en argile simple ou des foyers améliorés (Dit économique). La présence de ces différents types se concentre plus au niveau de la réduction des pertes thermiques par conduction au niveau des parois du foyer et à sa durabilité structurelle. Au sein des ménages Malagasy, l'utilisation de foyer métallique et des foyers améliorés est la plus prépondérante [3]. Pour notre étude, vu que les foyers à charbon de bois domestique utilisés tendent vers les foyers améliorés et à section circulaire, ce document sera focalisé sur les foyers à charbon de bois de section circulaire améliorée. Aussi, d'une manière générale, les ustensiles de cuisine (marmites ou poêles) utilisés à Madagascar sont de forme cylindrique. Où nous pouvons généraliser les formes de récipients de cuisson comme étant cylindriques dans le but de simplifier la modélisation du comportement des flux thermiques du foyer à charbon de bois. Ainsi, les récipients de cuisson seront ici caractérisés géométriquement par son rayon r et son hauteur h_r .

2.1. Flux thermique perdu par convection

Le flux thermique produite lors de la combustion du charbon de bois dans un foyer à charbon de bois \dot{Q}_{comb} se diffuse selon cinq quantités de chaleur différentes [4] :

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{pertecond} + \dot{Q}_{perteporte} + \dot{Q}_{humid} \quad (1)$$

\dot{Q}_{comb} est l'énergie thermique produite lors de la combustion du charbon de bois, on peut ainsi le décomposer en \dot{Q}_{conv} , l'énergie thermique transférée par convection du gaz de combustion vers le récipient de cuisson. Ce dernier s'écoule le long des parois inférieures du récipient de cuisson et sur la paroi supérieure du récipient de cuisson, \dot{Q}_{rad} est l'énergie thermique transférée par rayonnement provenant du charbon incandescent vers le milieu extérieur et vers le fond du récipient de cuisson. $\dot{Q}_{pertecond}$ représente la perte de chaleur par conduction au niveau du foyer vers le milieu extérieur. La technologie de fabrication du foyer (Foyer amélioré) permet de minimiser ce transfert. $\dot{Q}_{perteporte}$ représente la perte de chaleur qui sort par la porte d'entrée d'air du foyer et \dot{Q}_{humid} représente la perte de chaleur due à l'évaporation de l'humidité du charbon.

\dot{Q}_{rad} et \dot{Q}_{conv} constituent cependant les deux sources d'énergie thermique qui participent réellement à la cuisson en elle-même. Cela est dû au fait que ces deux sources d'énergie interagissent directement avec les parois du récipient de cuisson. Les autres formes de transfert ou de perte thermique $\dot{Q}_{pertecond}$, $\dot{Q}_{perteporte}$, \dot{Q}_{humid} , n'agisse qu'au niveau du flux thermique disponible au sein du foyer à charbon de bois. Néanmoins, les pertes thermiques par radiation sont assez négligeables. Ceci est dû au fait que les radiations issues des charbons incandescents sont dirigées et concentrées vers le fond du récipient de cuisson posé au-dessus du

foyer. Les études réalisées dans cet article se focalisent dès lors sur les pertes thermiques par convection apparaissant lors de l'interaction foyer-récipient.

Durant la cuisson, \dot{Q}_{conv} n'est pas totalement utilisée pour la cuisson, ce qui suggère qu'il y a une partie de cette énergie qui n'est pas transformée en travail et absorbée par le récipient de cuisson que nous allons noter \dot{W}_{conv} . Ce qui nous donne un flux thermique perdu par convection que nous allons noter \dot{Q}_{perdu} . Ce flux perdu s'exprime alors sous la forme :

$$\dot{Q}_{perdu} = \dot{Q}_{conv} - \dot{W}_{conv} \quad (2)$$

2.2. Flux de thermique transféré par convection

\dot{Q}_{conv} peut être déterminé selon l'équation suivante [3] :

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{m} \cdot \bar{c}_p \cdot (T_c - T_0) \quad (3)$$

Avec \dot{m} étant le débit massique du gaz chaud qui s'écoule de la zone de combustion vers le haut du réchaud, \bar{c}_p quant à lui représente la moyenne de la capacité calorifique à pression constante du gaz chaud (qui est un mélange de plusieurs types de gaz), T_c et T_0 désigne respectivement la température du gaz chaud juste à la sortie du foyer et la température ambiante. \dot{m} est donné par la relation suivante [3]:

$$\dot{m} = S \cdot \left(\frac{P}{R \cdot T_c}\right) \sqrt{2 \cdot g \cdot h_c \cdot \left(\frac{T_c - T_0}{T_0}\right)} \quad (4)$$

Où P est la pression du fluide chaud, celui-ci est à pression atmosphérique, car pour une combustion subsonique (la vitesse des gaz inférieure à la vitesse du son), la pression ne change pas [3]. R désigne la constante des gaz parfaits, S la section de passage du gaz chaud, c'est-à-dire, la section intérieure du foyer et g étant la force de pesanteur, h_c la hauteur du foyer.

Ce qui nous donne le flux thermique transféré par convection avec l'expression :

$$\dot{Q}_{conv} = S \cdot \left(\frac{P}{R \cdot T_c}\right) \sqrt{2 \cdot g \cdot h_c \cdot \left(\frac{T_c - T_0}{T_0}\right)} \cdot \bar{c}_p \cdot (T_c - T_0) \quad (5)$$

2.3. Flux de travail absorbé par le récipient de cuisson.

Le flux de travail absorbé \dot{W}_{conv} par le récipient correspond au flux d'exergie $\dot{X}_{chaleur}$ provenant du flux de chaleur \dot{Q}_{conv} par laquelle est soustrait le flux d'exergie $\dot{X}_{detruit}$ détruit durant l'interaction des gaz chauds sur les parois du récipient de cuisson.

$$\dot{W}_{conv} = \dot{X}_{chaleur} - \dot{X}_{detruit} \quad (6)$$

Pour déterminer $\dot{X}_{chaleur}$, Nous faisons appel au facteur de Carnot η_c pour déterminer la part du flux de chaleur qui peut être réellement transformée en travail.

$$\dot{X}_{chaleur} = \eta_c \cdot \dot{Q}_{conv} \quad (7)$$

Ce facteur de Carnot η_c dépend de l'écart de température initial et final. Nous pouvons supposer que le profil de température au sein du réchaud à charbon est linéaire. Ainsi, la température est linéaire entre T_0 et T_c . Nous pouvons donc déterminer la moyenne du facteur de Carnot pour tout le long du foyer :

$$\eta_c = \frac{1}{T_c - T_0} \cdot \int_{T=0}^{T_c} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dT = 1 - \frac{T_0}{T_c - T_0} \cdot \ln \frac{T_c}{T_0} \quad (8)$$

Ce qui nous donne

$$\dot{X}_{chaleur} = \left(1 - \frac{T_0}{T_c - T_0} \cdot \ln \frac{T_c}{T_0}\right) \cdot \dot{Q}_{conv} \quad (9)$$

Selon [3], le flux d'exergie $\dot{X}_{detruit}$ détruit durant l'interaction avec les parois du récipient de cuisson est proportionnelle au flux d'entropie généré qui en résulte.

$$\dot{X}_{detruit} = T_0 \cdot \dot{S}_{gen_{c-p}} \quad (10)$$

Le flux entropique $\dot{S}_{gen_{c-p}}$ généré durant l'interaction du gaz entre son point chaud c à température T_c et le point p de la paroi du récipient à température T_p peut s'écrire sous la forme :

$$\dot{S}_{gen_{c-p}} = \frac{\dot{Q}_{c-p}}{T_p} - \frac{\dot{Q}_{c-p}}{T_c} = \dot{Q}_{c-p} \cdot \left(\frac{T_c - T_p}{T_p T_c} \right) \quad (11)$$

Avec \dot{Q}_{c-p} Étant le flux thermique échangé entre le foyer et le récipient de cuisson.

D'où :

$$\dot{X}_{detruit} = \frac{T_0}{T_p} \cdot \left(1 - \frac{T_p}{T_c} \right) \cdot \dot{Q}_{c-p} \quad (12)$$

2.4. Estimation de l'échange de chaleur par convection foyer – récipient de cuisson

Pour le cas d'un récipient de cuisson, que nous généralisons ici de forme cylindrique, nous pouvons diviser sa surface en deux et ainsi avoir deux flux thermique distinct. Le premier, \dot{Q}_{ce} , se produit sur le fond du récipient de cuisson qui est une surface circulaire plane horizontale et le second, \dot{Q}_{cy} , sur la surface cylindrique verticale. Ce qui nous donne :

$$\dot{Q}_{c-p} = \dot{Q}_{ce} + \dot{Q}_{cy} \quad (13)$$

Avec $\dot{Q}_{ce} = h_{ce} \cdot S_{fond} \cdot (T_c - T_p)$ et $\dot{Q}_{cy} = h_{cy} \cdot S_{cyl} \cdot (T_s - T_p)$ dont h_{ce} et h_{cy} respectivement les coefficients de transfert par convection sur le fond du récipient de cuisson et sur la paroi du récipient de cuisson. Ici S_{fond} et S_{cyl} représentent respectivement le surface du fond et le surface de la paroi cylindrique du récipient de cuisson. Comme h peut s'écrire $h = \frac{Nu \cdot \lambda}{Lc}$, dont Nu est le nombre de Nusselt, λ la conductivité thermique du gaz et Lc est la longueur caractéristique de la surface où l'écoulement se produit. Pour les parois horizontale $Lc = D_{recip}$, D_{recip} représente le diamètre du fond du récipient de cuisson, ce qui fait que $h_{ce} = \frac{Nu_{ch} \cdot \lambda}{D_{recip}}$. Pour la paroi cylindrique verticale, $Lc = h_r$, h_r étant la hauteur du récipient de cuisson, ce qui nous donne $h_{cy} = \frac{Nu_{cv} \cdot \lambda}{h_r}$.

Avec Nu_{ch} et Nu_{cv} étant respectivement les nombres de Nusselt pour un transfert de chaleur par convection sur une plaque circulaire horizontale dont l'écoulement du gaz se fait sur la face du bas du récipient de cuisson et le nombre de Nusselt pour un échange de chaleur par convection le long de la surface cylindrique verticale du récipient de cuisson.

Au niveau du fond du récipient de cuisson, le transfert thermique par convection se fait par jet d'impact de gaz chaud.

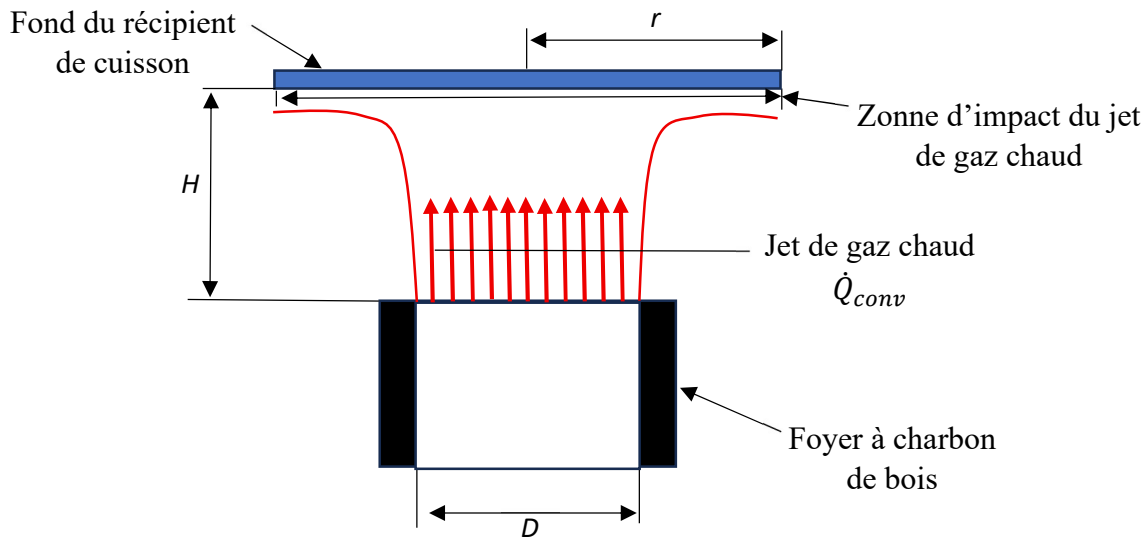


Fig. 1. Paramètres utiles pour l'étude de l'impact de jet de gaz chaud

Dans le domaine subsonique, nous pouvons écrire la corrélation du nombre de Nusselt pour l'échange comme la suivante [7][8][9]:

$$Nu_{ch} = \left(G \cdot \left(A_r \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot \left(\left(2 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + 0,005 \cdot Re^{0,55}) \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot Pr^{0,42}$$

$$\text{Avec } G = 2 \cdot A_r^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1 - 2,2 \cdot A_r^{\frac{1}{2}}}{1 + 0,2 \cdot \left(\frac{H}{D} - 6 \right) \cdot A_r^{\frac{1}{2}}} \right)$$

Pr étant le nombre de Prandtl du gaz chaud, λ sa conductivité thermique, Re le nombre de Reynolds associé à l'écoulement du gaz chaud sur le fond du récipient de cuisson. D le diamètre hydraulique du foyer à charbon de bois, H représente l'écart entre le foyer et le récipient de cuisson. Ici A_r représente la section relative impactée par le jet de gaz chaud. Elle dépend de la section du foyer et de la surface du récipient de cuisson avec $A_r = \frac{A_{rech}}{A_{recip}} = \frac{D^2}{4 \cdot r^2}$ avec r étant le rayon du récipient de cuisson. Ce qui nous donne :

$$\dot{Q}_{ce} = \pi \cdot r^2 \cdot \lambda \cdot \frac{\left(G \cdot \left(A_r \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot \left(\left(2 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + 0,005 \cdot Re^{0,55}) \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot Pr^{0,42}}{D_{recip}} \cdot (T_c - T_p) \quad (14)$$



Fig. 2. Écoulement du gaz chaud le long de la paroi verticale du récipient de cuisson

Pour évaluer \dot{Q}_{cy} , nous avons deux cas, le cas où l'écoulement est laminaire et le cas où l'écoulement est turbulent [10][11] Suivant les équations suivantes [10][11]:

$$\dot{Q}_{cy} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_r \cdot \frac{0,664 \cdot Re_{hr}^{\frac{1}{2}} \cdot Pr_{cy}^{\frac{1}{3}}}{h_r} \cdot \lambda (T_s - T_p) \quad \text{Pour le cas de l'écoulement laminaire} \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{cy} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_r \cdot \frac{0,037 \cdot Re_{hr}^{0,8} \cdot Pr_{cy}^{\frac{1}{3}}}{h_r} \cdot \lambda (T_s - T_p) \quad \text{Pour le cas de l'écoulement turbulent} \quad (16)$$

La température T_s est ici celui du gaz juste à la sortie du fond du récipient de cuisson, T_r la température du gaz juste après le récipient de cuisson, Re_{hr} nombre de Reynolds associé à l'écoulement le long de la paroi vertical du récipient et Pr_{cy} le nombre de Prandtl.

Nous obtenons alors une évaluation du flux de travail absorbé par le récipient de cuisson.

$$\dot{W}_{conv} = \left(1 - \frac{T_0}{T_c - T_0} \cdot \ln \frac{T_c}{T_0}\right) \cdot \dot{Q}_{conv} - \frac{T_0}{T_p} \cdot \left(1 - \frac{T_p}{T_c}\right) \cdot (U + I) \quad (17)$$

Et par la suite, nous obtenons l'expression du flux thermique perdu durant la cuisson avec l'expression ci-après.

$$\dot{Q}_{perdu} = \dot{Q}_{conv} - \left(\left(1 - \frac{T_0}{T_c - T_0} \cdot \ln \frac{T_c}{T_0}\right) \cdot \dot{Q}_{conv} - \frac{T_0}{T_p} \cdot \left(1 - \frac{T_p}{T_c}\right) \cdot (U + I) \right) \quad (18)$$

Avec

- $U = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_r \cdot W \cdot (T_s - T_p)$,
- $I = \pi \cdot r^2 \cdot \lambda \cdot \frac{\left(G \cdot \left(A_r \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot \left(\left(2 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + 0,005 \cdot Re^{0,55}) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right)}{D_{recip}} \cdot (T_c - T_p)$
- $W = \frac{Nu_{cv} \cdot \lambda}{h_r}$

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les modèles élaborés précédemment nous permettent de comprendre le mode de transfert thermique par convection mis en jeu au niveau du foyer à charbon de bois. Ces modèles nous permettent d'obtenir des résultats théoriques selon de multiples variables physiques et thermodynamiques. Cependant, ce travail sera plus focalisé sur les variables physiques qui sont influençables par le niveau des ménages. Suivant cette approche, les variables étudiées sont alors les dimensions du foyer à charbon de bois, les dimensions du récipient de cuisson et la masse du charbon de bois en combustion dans le foyer à charbon de bois.

3.1. Perte thermique due à la masse de charbon de bois en combustion

Il est intéressant d'analyser le comportement thermique du foyer selon la masse de charbon de bois en combustion dans celui-ci par rapport au flux thermique perdu. Pour en faire l'analyse, nous allons reprendre le rendement moyen de 30,7% [5][6] pour un foyer à charbon de bois amélioré ICS (Improved Cook Stoves).

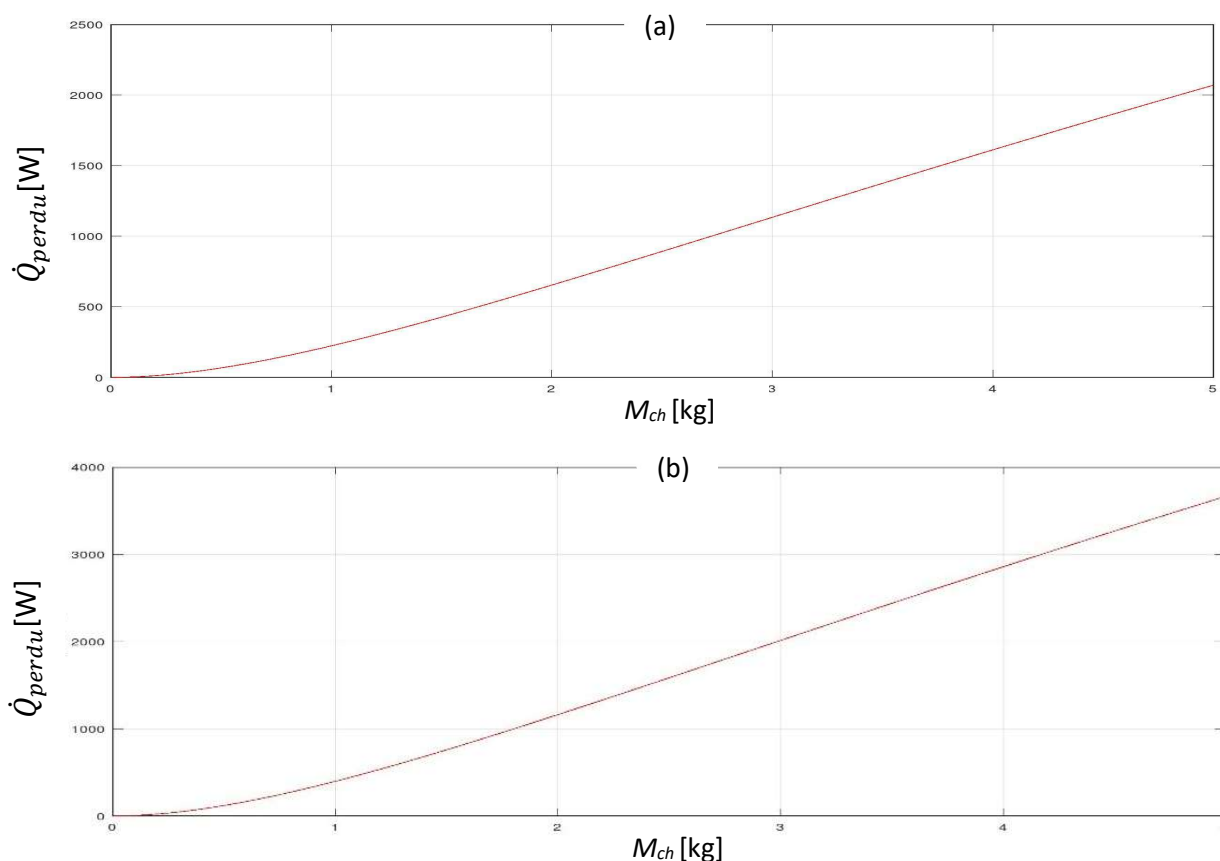


Fig. 3. Variation du flux thermique perdu \dot{Q}_{perdu} en fonction de la masse M_{ch} de charbon de bois en combustion ($r = 0,2$ [m]), $D = 0,4$ [mm])

Fig. 3 représente la variation du flux thermique perdu en fonction de masse M_{ch} de charbon de bois en combustion dans le foyer. Nous constatons ici que jusqu'à une certaine masse de charbon, l'allure de la courbe n'est pas linéaire avec une pente moins importante. Et ceci pour toutes les valeurs du diamètre du foyer avec un rayon du récipient de cuisson fixe. Cette forme de courbe dénote que l'augmentation de la masse de charbon de bois en dessous d'une masse particulière n'entraîne pas directement et excessivement une augmentation du flux thermique perdu. Sur Fig. 3. (a) cette masse maximale correspond à environ 1,2 [kg] et pour Fig. 3. (b) la masse limite est d'environ 0,8 [kg], au-delà de ces masses, la courbe des flux thermique perdu est quasi linéaire. Cette forme de courbe indique le flux thermique perdu qui croît autant que la masse de charbon augmente. Ce qui indique qu'au-delà de cette masse limite, la masse de charbon supplémentaire en combustion augmente le flux thermique produit pour accélérer la cuisson mais diminue le rendement. Cette masse excédentaire de charbon de bois ne contribue pas de manière optimale à la cuisson. En d'autres termes, plus nous ajoutons de plus de charbon en combustion, plus le réchaud est moins efficace énergétiquement. Mettre beaucoup de charbon, certes, augmente le flux thermique utile à la cuisson, mais diminue le rendement du foyer. Gérer correctement la masse de charbon introduit dans le foyer à charbon permet d'économiser sur la consommation de charbon de bois. Sur l'ensemble, nous constatons, pour comparaison, que pour une même masse de charbon en combustion de 1

[kg], le flux thermique perdu est d'autant plus important que le rapport entre le diamètre du récipient de cuisson et le foyer est plus important. Ce qui nous amène à étudier, pour la suite de ce travail, l'effet des dimensions, que ce soit au niveau du récipient de cuisson et celui du foyer, sur les pertes de flux thermique.

3.2. Perte thermique due au diamètre de sortie du foyer à charbon de bois

Le diamètre de sortie D du foyer à charbon de bois (Fig. 4) constitue la partie la plus visible lors du choix d'un foyer à charbon de bois. Celui-ci correspond dans l'imaginaire collectif de la société Malagasy à la puissance thermique du foyer à charbon de bois et plus largement au rapport entre économie de charbon de bois et puissance thermique pour le choix de ce dernier. Comprendre l'influence du diamètre sur la perte de flux thermique durant la cuisson est important pour maîtriser les dépenses en charbon de bois et aussi pour améliorer le rendement thermique de la cuisson.

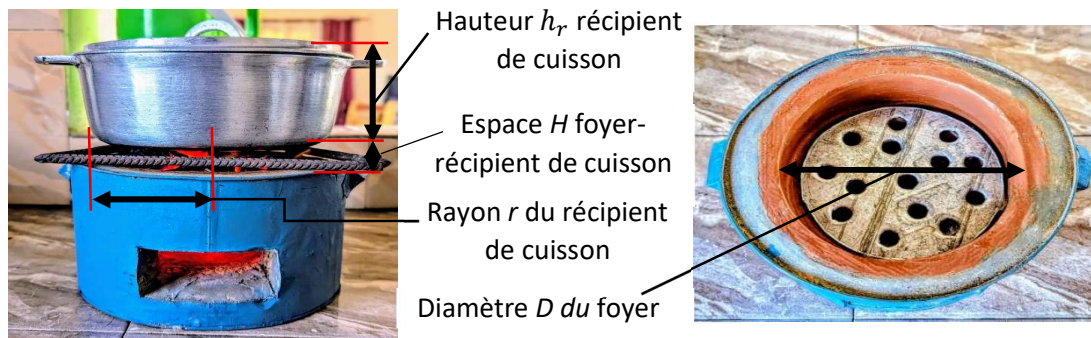


Fig. 4. Configuration du foyer à charbon de bois et du récipient de cuisson

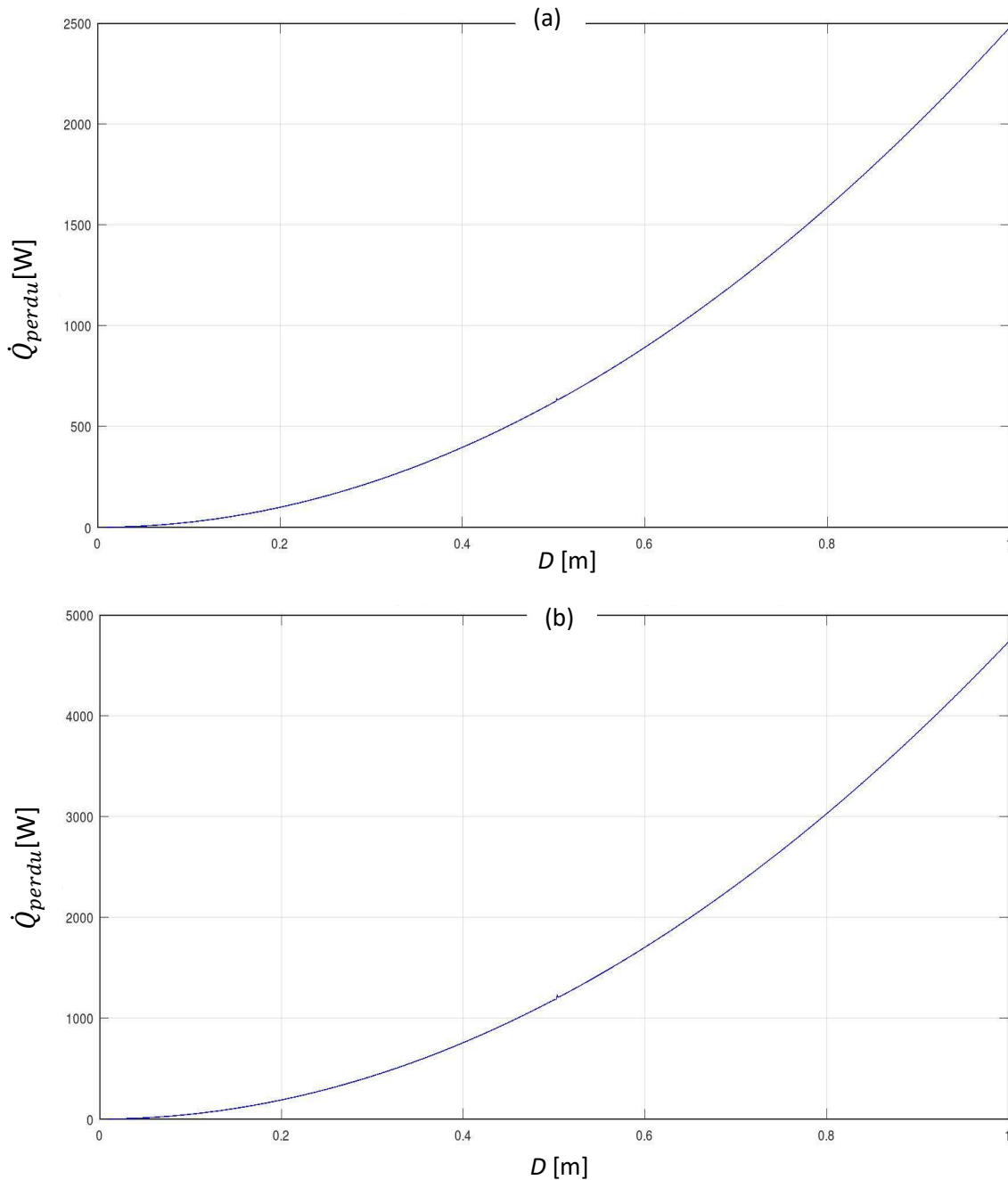


Fig. 5. Variation du flux thermique perdu \dot{Q}_{perdu} en fonction du diamètre D du foyer ($r = 200$ [mm]) ((a) : $M_{ch} = 1$ [kg] , (b) : $M_{ch} = 1,5$ [kg])

La Fig. 5 met en exergue l'influence du diamètre du foyer sur le flux thermique perdu. Le graphique présente une courbe strictement croissante, non linéaire (Quasi exponentielle). Cela nous amène à penser qu'au fur et à mesure que le diamètre D du

foyer augmente, le flux thermique \dot{Q}_{perdu} augmente exponentiellement. En d'autres termes, un foyer ayant un diamètre plus important occasionnera plus de perte de flux thermique que pour un foyer de diamètre inférieur. Cependant, nous constatons sur la Fig. 5 que jusqu'à approximativement le diamètre $D = 0,4$ [m], la pente des pertes thermiques reste assez faible pour toutes les masses M_{ch} (1 [kg], 1,5 [kg]) de charbon. En d'autres termes, la pente est plus faible jusqu'à ce que le diamètre du foyer et celui du récipient de cuisson soient égaux. Cette relation est attendue puisque la surface d'échange foyer/récipient ne change pas car le diamètre du récipient de cuisson étant fixé. Tout le flux thermique produit au-delà de la paroi du récipient de cuisson sera directement perdu, augmentant ainsi \dot{Q}_{perdu} .

Dans la réalité, ceci se traduit par une moindre efficacité énergétique du réchaud si le diamètre du récipient de cuisson est bien inférieur à celui du foyer utilisé. Il est alors nécessaire, dans un souci d'efficacité énergétique des foyers à charbon de bois, d'utiliser des réchauds et des récipients de cuisson adéquats.

3.3. Perte thermique due à l'écart vertical récipient-foyer et la taille du récipient de cuisson

Nous avons vu plus haut que le diamètre du récipient de cuisson exerce une influence sur les pertes de flux thermique au foyer à charbon de bois. Qu'en est-il de l'écart entre le récipient de cuisson et le foyer à charbon (Fig. 4)? Dans cette optique, nous avons modélisé le comportement du flux thermique perdu suivant le rapport entre H/D qui représente le rapport entre l'espacement récipient de cuisson-foyer à charbon de bois et le diamètre du foyer à charbon de bois pour différentes valeurs du rayon du récipient de cuisson. Pour notre étude, nous fixons le diamètre du foyer à 300 [mm] pour permettre une plus grande plage de valeur.

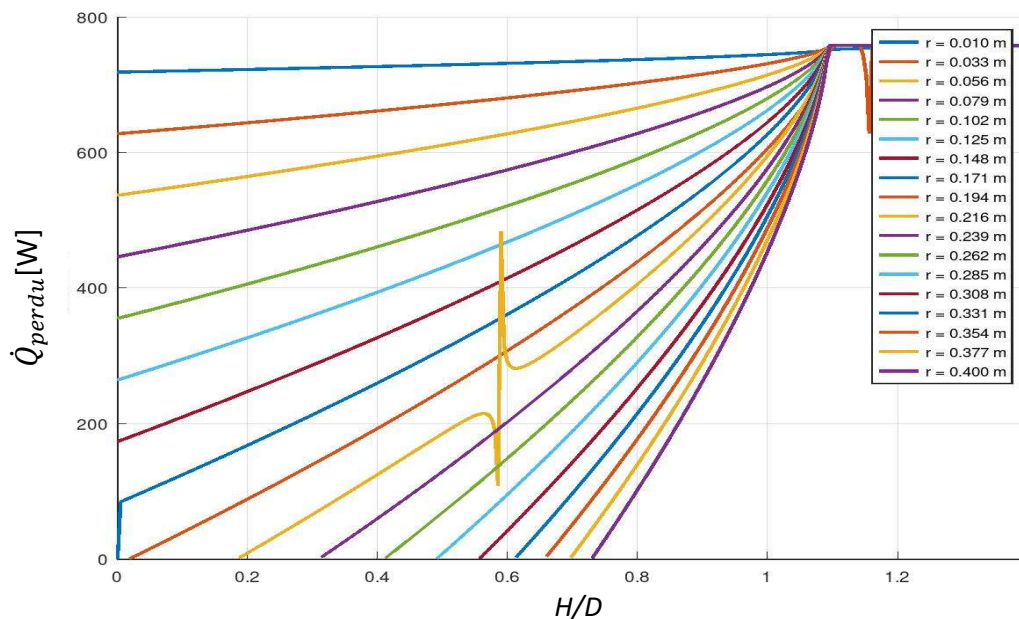


Fig. 6. Variation du flux thermique perdu \dot{Q}_{perdu} en fonction de H/D pour différentes valeurs du rayon du récipient de cuisson ($M_{ch} = 1,5$ [kg], $D = 0,3$ [m])

Au premier abord, il y a présence de point particulier qui est visible sur la Fig. 6. Les courbes se chevauchent à un point particulier où le rapport H/D est d'environ 1,3. Ce point correspond à un maximum. En outre, ce point correspond au flux thermique produit par le foyer en considérant qu'il n'y a pas de récipient de cuisson posé par-dessus. En amont de ce point, nous constatons que le flux thermique perdu augmente quasi linéairement, puis augmente de façon exponentielle au voisinage du point. En ce point maximum, le flux thermique perdu ne varie plus avec le rapport H/D . Ce phénomène témoigne de l'importance de ne

pas dépasser le rapport H/D correspondant à ce point pour rester dans un domaine où les pertes thermiques sont `` acceptables``. Le rapport H/D correspondant à ce point est donc un rapport limite.

Quoique, ce rapport H/D limite représente seulement la limite à ne pas dépasser pour la pose du récipient de cuisson au-dessus du foyer à charbon de bois selon son rayon mais ne signifie pas l'optimum. La Fig. 5 permet de déterminer l'optimum pour une utilisation plus efficace des foyers pendant la cuisson. Ce graphique que nous avons modélisé fonctionne comme un abaque pour configurer l'espacement foyer-récipient pour la cuisson.

En regardant l'axe des abscisses, nous pouvons constater que le flux thermique perdu coupe l'axe des abscisses pour certain valeur du rayon r du récipient de cuisson en des rapports H/D distinct. Le flux thermique perdu y est donc nul. En revanche, pour certaine valeur de r , il y a des courbes qui ne coupent pas l'axe des abscisses mais celui des ordonnées et donc n'est jamais nulle. Pour ces valeurs des r , le flux thermique perdu est directement élevé quelle que soit la valeur du rapport H/D . Ici, comme le diamètre du foyer est de 300 [mm], ces rayons de récipient correspondent à des récipients de cuisson dont leurs diamètres sont inférieurs à celui du foyer. Utiliser un récipient de cuisson de taille inférieure à celui du foyer est donc à éviter pour un meilleur rendement du foyer à charbon de bois.

Pour bien comprendre, le flux thermique perdu est optimal, pour chaque rayon du récipient de cuisson, sur les points où les courbes coupent l'axe des abscisses avec les rapports H/D correspondants. Il ne faut pas que le diamètre du récipient de cuisson soit inférieur à celui du foyer à charbon de bois. Le rapport H/D ne doit pas aussi dépasser le point maximal d'intersection des courbes pour un meilleur rendement thermique de la cuisson. Pour un même rapport H/D , le flux thermique perdu pour un récipient de rayon inférieur sera plus important que pour un récipient de rayon supérieur à ce dernier.

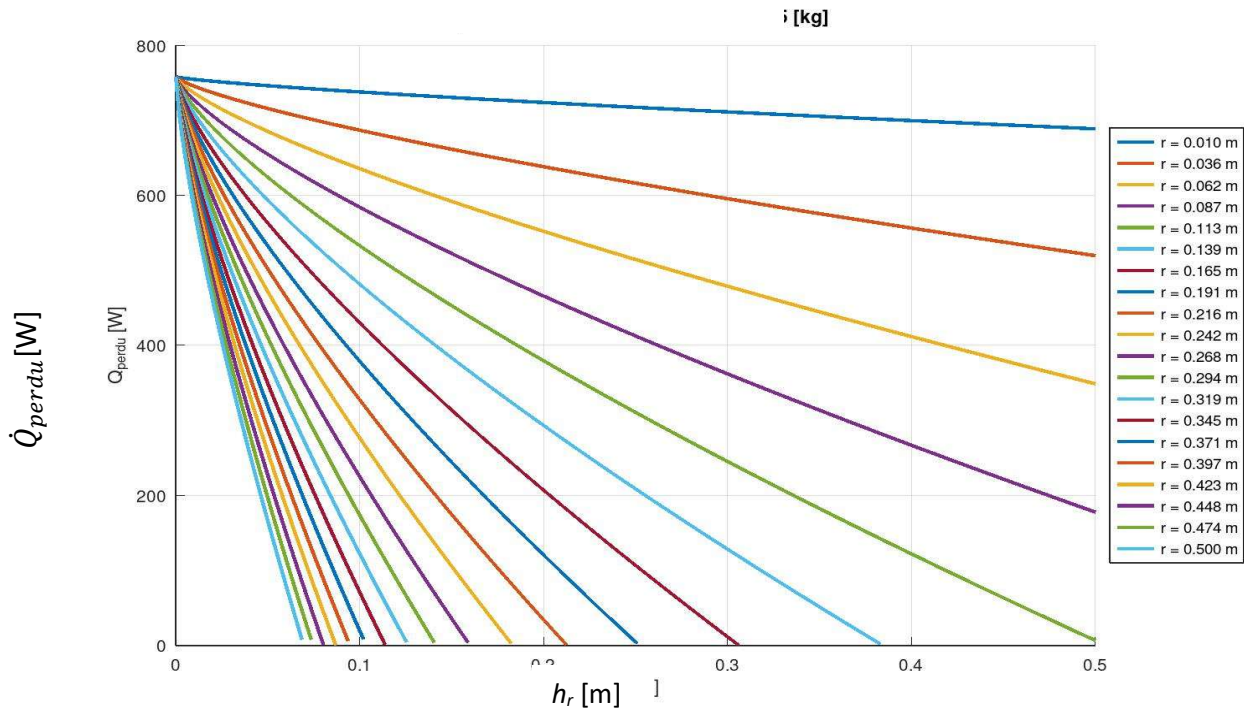


Fig. 7. Variation du flux thermique perdu \dot{Q}_{perdu} en fonction de h_r pour différentes valeurs du rayon r du récipient de cuisson ($M_{ch} = 1,5 [kg]$)

Fig. 7 montre la relation entre les flux thermiques perdus en fonction de la hauteur h_r du récipient de cuisson pour différentes valeurs du rayon r du récipient de cuisson (Fig. 4). En effet, d'après notre modèle, la hauteur du récipient de cuisson joue un rôle sur la quantité de flux thermique perdu durant la cuisson. Sur Fig. 7, nous constatons que le flux thermique perdu est maximal et concentré sur un même point quand h_r est de nulle et ceci quel que soit le rayon du récipient de cuisson. Après ce point, les courbes sont décroissantes, ce qui nous indique que le flux thermique perdu décroît au fur et à mesure que la hauteur du récipient de cuisson augmente. Utiliser un ustensile plus haut permet d'améliorer le rendement du foyer à charbon de bois. Cependant, comme notre modèle le montre, les courbes des flux thermiques perdu coupent l'axe des abscisses en des valeurs de h_r différents pour chaque valeur de r . Les flux thermiques perdus sont quasi nuls en ces points. Nous considérons que l'optimum de la hauteur du récipient de cuisson est atteint en ces points où la courbe coupe l'axe des abscisses. C'est-à-dire que dépendamment du rayon du récipient de cuisson, il y a une hauteur minimale à respecter pour que le rendement thermique de la cuisson soit optimal. En dessous de cette hauteur, la perte de flux thermique est croissante et au-dessus de cette dernière, utiliser un récipient de cuisson plus haut n'a plus de sens et que cet excédant de hauteur ne participe plus à la cuisson en elle-même.

IV. CONCLUSION

Ce travail nous permet de comprendre plus en détails les paramètres utiles pour une utilisation rentable, écologique et responsable des foyers à charbon de bois. Introduire beaucoup plus de charbon de bois que nécessaire n'entraîne pas un meilleur rendement thermique du foyer-récipient. En outre, plus nous ajoutons de charbon de bois, plus nous aurons de perte thermique. Au niveau de la taille du foyer à charbon de bois, d'une manière générale, il est préférable d'utiliser un foyer dont le diamètre est inférieur à celui du récipient de cuisson. Il y a un espacement entre le foyer et le récipient qu'il ne faut pas dépasser pour ne pas impacter d'autant plus le rendement du foyer. Aussi, un écart optimal peut être déterminé pour chaque valeur du rayon du récipient de cuisson. À cela s'ajoute le fait qu'il y a une hauteur maximale à respecter pour le récipient de cuisson et pour que l'utilisation

du foyer soit optimale. Des améliorations fonctionnelles sont dès lors indispensables au niveau des foyers à charbon de bois pour permettre des ajustements au niveau du diamètre et de l'espacement foyer-récipient. Aussi, une étude de la normalisation des dimensions des récipients de cuisson devrait être entreprise dans l'optique de rentabiliser l'utilisation du foyer à charbon de bois. Mais plus important encore, il faudrait mettre en place des séances de sensibilisation au niveau communautaire sur l'utilisation responsable des foyers à charbon de bois.

RÉFÉRENCES

- [1] Forestry Production and Trade
<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>, (consulté le 12 juin 2023)
- [2] La gestion durable des ressources en bois-énergie : un défi pour Madagascar
<https://www.wwf.mg/?17423941/La-gestion-durable-des-ressources-en-bois-energie--un-defi-pour-Madagascar>, 7 Mars 2025 (Consulté le 3 novembre 2025)
- [3] Augustin L.M., Vertomene S.T., Bernard N.N., Sadiki A., Haddy M.K. « A New Perspective on Cooking Stove Loss Coefficient Assessment by Means of the Second Law Analysis », 24(8), 1019, Entropy 2022, <https://doi.org/10.3390/e24081019>
- [4] Ralibera Andriamifidy Gérard, Randrianirainy Huchard Paul Berthin, Andrianaivoravelona Jaconnet Oliva, Randriambololona Sabin, « Comparaison Des Consommations De Charbon De Bois Des Foyers Améliorés Et Des Foyers Métalliques, Une Approche Modélisée », International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT), Vol. 41 No pp. 425-435, 1 Octobre 2023, <https://doi.org/10.52155/ijpsat.v41.1.5712>
- [5] Kafayat Adeyemi, Nasiru Lawal and Abraham Asere, « Thermal Performance of Improved Charcoal Stove as a Clean Development Mechanism Project- A Case Study of Bauchi », FUOYE Journal of Engineering and Technology, April 2017, <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v2i1.62>
- [6] Evrard Karol Ekouedjen et Al, « Energy performance, safety and durability of charcoal stoves commonly used in West Africa: Benin case study », AIMS Energy, 9(1): 68-95, December 2020, <https://doi.org/10.3934/energy.2021005>
- [7] Unnikrishnan K S, Sabu Kurian, Jijo Johnson, «Study of Jet Impingement Heat Transfer», International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 05 Issue: 04, Avril 2018.
- [8] Janet de Grazia, «Introducing to impingings jets», Department of Chemical & Biological Engineering, University of Colorado Boulder, 2016.
- [9] Unnikrishnan K S, Sabu Kurian, Jijo Johnson, « Heat Transfer Augmentation through Different Jet Impingement Techniques: A State-of-the-Art Review», Energies, 14, 6458, Octobre 2021, <https://doi.org/10.3390/en14206458>
- [10] <http://www.pathways.cu.edu.eg/ec/Text-PDF/Part%20B-9.pdf>
- [11] Lenert, Andrej, Youngsuk Nam, Evelyn N. Wang, « heat transfer fluids», Annual Rev Heat Transfer 15, no. 15 (2012): 93–129, 2012, <https://doi.org/10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2012004122>