

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE/SCIENCES
TECHNOLOGIES ET
GEOSCIENCES(CRFD/STG)

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE
PHYSIQUES ET APPLICATIONS

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCES, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES
(CRFD/STG)

DOCTORATE RESEARCH UNIT FOR
PHYSICS AND APPLICATIONS

DEPARTMENT OF PHYSIC

E-mail : enquiries@uylecoledoc.com

Site web : www.uylresarchstg.cm

E-mail : enquiries@uylecoledoc.com

Site web : www.uylresarchstg.cm

LABORATOIRE D'ENERGIE, DES SYSTEMES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES
ENERGY LABORATORY, ELECTRICALS AND ELECTRONICS SYSTEMS

MODELISATION MATHEMATIQUE ET SIMULATION NUMERIQUE DES FOURS AMELIORES AU CAMEROUN

Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master of Science in Physics

Spécialité : Energie des Systèmes Électriques et Électroniques

Option : Energie et Environnement

Par :

DONKENG KEUBOUB Rolande

Matricule : 15I2735

Licenciée en Physique

Sous la direction de :

Professeur TCHINDA René

Université de Dschang



Année 2024

DEDICACE

Par la grâce de Dieu Tout-Puissant, nous avons pu effectuer ce travail que je dédie à mes chers parents : Papa **Keubou Etienne** et Maman **Asangmo Keubou Albertine**.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je rends grâce à **Dieu** Tout-Puissant qui m'a fortifiée tout au long de ce travail et m'a capacité à rédiger ce mémoire.

J'exprime toute ma gratitude au **Professeur Tchinda René** pour son expertise, ses conseils et la disponibilité dont il m'a fait honneur tout au long de ce travail.

Je remercie chaleureusement tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce travail.

Je remercie **Dr Talla Armel** de l'IUT de Bandjoun pour son aide. Ses conseils m'ont été d'un grand soutien dans l'avancement de ce mémoire.

Je remercie également mes aînés académiques notamment **Dr Mahamat Hassane Babikir, Chara-Dackou Venant Sorel** et **Nzadie Siewé Elie** pour leur expertise indispensable à ce travail.

Des chaleureux remerciements vont à l'endroit de mes parents **Keubou Etienne et Asangmo Albertine** qui m'ont toujours soutenue financièrement et émotionnellement dans mes études, merci pour vos efforts sans lassitude pour que je sois où je suis aujourd'hui.

Je porte une attention particulière à toutes ces personnes qui m'ont apporté leur soutien à savoir : **Mboutcheu Clémence, Njiké René, Tiomela Yvan, Ngandop Audrey, Magné Stéphanie, Yamdjeu Edouard, Danga Freddy, Bayaola Steve, Zambou Armel, Magatsing Chivarol, Wofo Christian** et mes **promotionnaires**. Merci pour vos conseils.

Je ne saurai fermer cette page de remerciements sans dire un merci particulier à tous les membres de ma famille qui m'ont été d'un grand soutien lors de la rédaction de ce mémoire de par leurs conseils et leurs apports émotionnels.

J'ai peut-être oublié certaines personnes qui je l'espère comprennent que c'est bien de façon involontaire.

RESUME

Dans les pays en voie de développement notamment au Cameroun, le bois en tant que combustible est consommé de façon abusive à cause des foyers inadéquats utilisés. Avec la croissance démographique et l'accès limité pour la population à d'autres ressources énergétiques par rapport au bois, ce phénomène ne fera que s'accroître causant ainsi un impact négatif sur notre environnement et l'épanouissement de nos générations futures. Afin de préserver cet environnement, nous proposons dans cette étude de faire une optimisation du rendement énergétique d'un four amélioré par la modélisation mathématique et la simulation numérique. La méthode utilisée lors de la modélisation est la méthode d'approche de réseau thermique qui nous a permis d'obtenir un système de huit (8) équations différentielles avec lequel nous avons effectué une simulation dans le logiciel Matlab pour obtenir les courbes de température et du rendement énergétique du four étudié. Après l'obtention des résultats, nous remarquons que les courbes de température sont en accord avec les réalités physiques et le rendement énergétique obtenu est de 22,7%. Cette valeur est beaucoup plus grande que celle du four traditionnel estimée entre 8% et 15 % ce qui favorise la réduction de la consommation du combustible utilisé pour la cuisson et différente de celle de la littérature à cause de la différence des paramètres utilisés. Afin d'optimiser ce rendement, une étude a été faite pour différents isolants de même épaisseur à savoir la terre cuite, la sciure de bois et le copeau de bois en remplaçant l'isolant du four. Le résultat obtenu nous a donné un rendement énergétique maximal de 23,5 % avec comme isolant le copeau de bois. Par ces résultats, nous pouvons dire qu'il est important de choisir un four dont l'isolant possède une très faible valeur de conductivité thermique car il possèdera un bon rendement énergétique. Dans la même lancée, nous avons fait une étude sur l'influence de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement et en augmentant la valeur de l'épaisseur de l'isolant de 0,01m, nous avons obtenu un rendement de 23 %. En effet, lorsque l'épaisseur d'un isolant croît, cela augmente la valeur du rendement énergétique du four.

Mots clés : Four amélioré, modélisation, rendement énergétique, simulation, combustion, optimisation.

ABSTRACT

In developing countries such as Cameroon, wood as a fuel is abused because of the inadequate stoves used. With demographic growth and the population's limited access to other energy resources than wood, this phenomenon will only increase, causing a negative impact on our environment and the development of our future generations. In order to preserve this environment, we propose in this study to optimize the energy efficiency of an improved furnace through mathematical modeling and numerical simulation. The method used for the modeling is the thermal network approach, which enabled us to obtain a system of eight (8) differential equations with which we carried out a simulation in Matlab software to obtain the temperature and energy yield curves of the furnace studied. After obtaining the results, we note that the temperature curves agree with the physical realities, and the energy yield obtained is 22.7%. This value is much higher than that of the traditional kiln, estimated at between 8% and 15%, which helps to reduce the consumption of the fuel used for firing, and differs from that in the literature due to the different parameters used. In order to optimize this efficiency, a study was carried out for different insulation materials of the same thickness: terracotta, sawdust and wood shavings, replacing the furnace insulation. The result was a maximum energy yield of 23.5% with wood shavings as insulation. These results show that it is important to choose a furnace with insulation of very low thermal conductivity, as this will ensure good energy efficiency. In the same vein, we studied the influence of insulation thickness on efficiency, and by increasing the energy efficiency value by 0.01m, we obtained an efficiency of 23%. In fact, as insulation thickness increases, so does the furnace's energy yield.

Key words: Improved ovens, Modelling, energy efficiency, Simulation, combustion, optimization

Table des matières

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	iii
RESUME.....	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I: Revue de la littérature	3
Introduction	3
I.1. Présentation de la situation énergétique du Cameroun	3
I.2. Ressources énergétiques fossiles ou non-renouvelables.....	4
I.3. Ressources énergétiques renouvelables	5
I.4. Généralités sur les fours améliorés.....	6
I.4.1. Définition des fours améliorés.....	7
I.4.2. Caractéristiques des fours améliorés	8
I.5. La physique fondamentale régissant le transfert de chaleur dans les fours améliorés	9
I.5.1. Les modes de transfert de chaleur	10
I.6. Quelques exemples de fours améliorés	11
I.6.1. Four Rocket	11
I.6.2. Four à simple paroi	12
I.6.3. Four Nansu	12
.....	12
I.6.4. Four à double paroi.....	13
I.7. Principales sources énergétiques utilisées.....	13
I.7.1. Propriétés énergétiques, physiques et chimiques du bois.....	13
I.7.2. Le charbon de bois.....	17
Conclusion.....	18
Chapitre II: Matériel et méthodes	19
Introduction	19
II.1. Présentation du logiciel Matlab	19
II.2. Présentation du four choisi.....	20
II.2.1. Géométrie du modèle	20
II.2.2. Principes de la modélisation mathématique	21

II.2.3. Méthode d'approche du réseau thermique	22
II.3. Bilan d'énergie.....	25
II.3.1. Expression des flux d'énergie	26
II.3.2. Equations de fonctionnement	30
II.3.3. Calcul de quelques facteurs de forme	31
II.3.4. Discrétisation des équations	32
II.3.5. Rendement énergétique du four	35
Conclusion.....	37
Chapitre III: Résultats et discussions.....	38
Introduction	38
III .1. Présentation des courbes de température des nœuds du système thermique	38
III.2. Discussion des différentes courbes	42
III.3. Courbes du rendement énergétique.....	43
III.4. Influence du type d'isolant sur le rendement énergétique	44
III.5. Influence de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement énergétique	45
Conclusion.....	46
Conclusion générale et perspectives	47
Références bibliographiques	48

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Carte du Cameroun [10].....	4
Figure I.2 : Image d'un four amélioré [13]	7
Figure I.3: Schéma de la section du four avec les modes de transfert de chaleur [17]	9
Figure I.4:les trois modes de transfert de chaleur [18]	11
Figure I.5: Four amélioré Rocket [19].....	11
Figure I.6: Four simple paroi [19]	12
Figure I.7 : Foyer amélioré Nansu [19]	12
Figure I.8: Four amélioré double paroi [19]	13
Figure I.9: Bois de chauffage [21]	14
Figure I.10: Évolution du PCI en fonction de l'humidité relative [22]	15
Figure I.11: Charbon de bois [25].....	17
Figure II.1: Présentation du four étudié	20
Figure II.2: Schéma représentatif des différentes températures du système thermique.	23
Figure II.3: Réseau thermique du système (Four et Marmite)	25
Figure II.4: Transfert de chaleur par conduction dans le four [30]	26
Figure II.5: Transfert de chaleur par convection dans la cuisinière [31]	27
Figure II.6: Transfert de chaleur par rayonnement dans la cuisinière [31].....	29
Figure II.7: Surfaces considérées pour le calcul des facteurs de forme	32
Figure III.1: Courbes de température des différents nœuds du système thermique	38
Figure III.2: Variation de la température aux nœuds 1 et 2 en fonction du temps.....	39
Figure III.3: Variation des températures aux nœuds 3 et 4 en fonction du temps.....	40
Figure III.4: Variation de la température pour les nœuds 5 et 6 en fonction du temps ..	40
Figure III.5: Variation de la température des nœuds 7 et 8 en fonction du temps	41
Figure III.6: Courbe de température pour le nœud 10 du système thermique	42
Figure III.7: Profil de température des différents nœuds du système thermique pour la configuration 3.....	43
Figure III.8: Courbe du rendement énergétique du four d'étude	43
Figure III.9: Courbes du rendement énergétique pour plusieurs isolants.....	44
Figure III.10: Courbes du rendement énergétique pour différentes épaisseurs	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1: Dimensions du four étudié	21
Tableau II. 2: Dimensions de la marmite	21
Tableau II. 3: Description de la température des différents nœuds	23
Tableau II. 4: Paramètres de simulation.....	36

NOMENCLATURE

Désignations		Unité
A_1	Surface de base intérieure du four	(m ²)
A_2	Surface de la paroi intérieure du four	(m ²)
A_3	Surface extérieure de la paroi interne du four	(m ²)
A_4	Surface extérieure de la base de la marmite	(m ²)
A_5	Surface intérieure de la base de la marmite	(m ²)
A_6	Surface de la paroi intérieure de la marmite	(m ²)
A_7	Surface de la paroi extérieure de la marmite	(m ²)
A_8	Surface intérieure du couvercle de la marmite	(m ²)
A_9	Surface extérieure du couvercle de la marmite	(m ²)
A_{10}	Surface extérieure de la paroi externe du four	(m ²)
C_{pC}	Chaleur massique du combustible	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
C_{pw1}	Chaleur massique de la paroi interne du four	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
$C_{p_{air1}}$	Chaleur massique de l'air intérieur du four	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
$C_{p_{air2}}$	Chaleur massique de l'air à l'intérieur de la marmite	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
$C_{p_{b\ pot}}$	Chaleur massique de la base de la marmite	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
$C_{p_{s\ pot}}$	Chaleur massique des murs de la marmite	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
$C_{p_{cover}}$	Chaleur massique du couvercle de la marmite	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
$C_{p_{base}}$	Chaleur massique de la base du four	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
C_{pw2}	Chaleur massique de la paroi externe du four	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
e_{base}	Épaisseur de la base du four	(m)
F_{ij}	Facteur de forme entre la surface i et la surface j	
h_1	Coefficient de transfert thermique de l'air intérieur au four	(W. m ⁻² K ⁻¹)
h_2	Coefficient de transfert thermique de l'air intérieur à la marmite	(W. m ⁻² K ⁻¹)
h_3	Coefficient de transfert thermique de l'air ambiant	(W. m ⁻² K ⁻¹)
$K_{isolant}$	Conductivité thermique de l'isolant	(W. m ⁻¹ K ⁻¹)
$e_{isolant}$	Épaisseur de la couche isolante du four	(m)
K_{base}	Conductivité thermique de la base du four	(W. m ⁻¹ K ⁻¹)
m_c	Masse du combustible	(kg)

m_{w1}	Masse de la paroi interne du four	(kg)
m_{w2}	Masse de la paroi externe du four	(kg)
m_{air1}	Masse de l'air du four	(kg)
m_{air2}	Masse de l'air intérieur de la marmite	(kg)
$m_{b\ pot}$	Masse de la base de la marmite	(kg)
$m_{s\ pot}$	Masse des côtés de la marmite	(kg)
m_{cover}	Masse du couvercle du pot	(kg)
$\dot{m}$	Taux de combustion du bois	(kg/s)
PC	Puissance thermique	(J.kg ⁻¹)
$U_{c,ij}$	Coefficient de transfert thermique par conduction entre le nœud i et le nœud j	(W.K ⁻¹)
$Q_{combustible}$	Énergie fournie par la source de chauffage	(J)
T_i	Température du nœud	(K)
T_0	Température initiale du système	(K)
R	Rayon interne du four	(m)
V	Vitesse du vent	(m. s ⁻¹)
ρ_c	Masse volumique du combustible	kg/m ³
ρ_{alu}	Masse volumique de l'aluminium	kg/m ³
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	kg/m ³

Lettres grecques

ε	Émissivité de l'aluminium	
η	Efficacité de combustion du bois.	%
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	(W.m ⁻² K ⁻⁴)
λ	Conductivité thermique	W. m ⁻¹ K ⁻¹
t	Temps	(s)
c	Combustible	
i	Incrémentation	
0	Initial	
b	Base	
s	Murs de la marmite	
W1 ,2	Mur interne et externe du four	

Abréviations

FAO	Food and Agriculture Organisation
Kilo	Kilogramme
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
HR	Humidité Relative
SONARA	Société Nationale de Raffinage
TCF	Trillion Cubic Feet
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
CO	Monoxyde de Carbone
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
SPM	Matières Particulaires en Suspension

INTRODUCTION GENERALE

La moitié de la population mondiale, estimée à près de quatre (4) milliards d'individus, utilise encore des combustibles solides pour cuisiner et se réchauffer. Dans certains pays d'Amérique centrale, d'Asie de l'Est et du Pacifique, l'utilisation du bois comme combustible est assez importante mais pas autant qu'en Asie du Sud et en Afrique Subsaharienne. En effet, environ 2,6 milliards de la population mondiale cuisinent sur des fours inefficaces qui brûlent abusivement du bois et sans aucune politique traitant ce problème, ce nombre passera à plus de 2,7 milliards d'ici 2030 [1]. En Afrique Sub-Saharienne notamment au Cameroun, la majorité des ménages utilisent du bois et du charbon de bois comme principale source d'énergie domestique soit un pourcentage d'environ 70%. Cette situation est plus importante en milieu rural car elle concerne près de 92% de ménages cuisinant sur les fours traditionnels à trois pierres [2]. Ces fours traditionnels sont apparus avec les premières poteries, ils ont été utilisés pendant des milliers d'années et continuent d'être utilisés de nos jours malgré le fait qu'ils favorisent une mauvaise combustion et de nombreux problèmes de santé voire même des décès. Notons qu'environ 4000 personnes meurent au Cameroun chaque année à cause des fumées toxiques des fours traditionnels et les personnes les plus exposées sont les femmes et les enfants qui passent plus de temps à la cuisine. Parmi les problèmes de santé auxquels elles font face, nous pouvons citer au niveau du système respiratoire (troubles respiratoires, bronchite chronique, cancer du poumon, tuberculose, asthme) et au niveau des yeux (conjonctivite, cataracte, cécité partielle) à cause des fumées produites qui comportent les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les matières particulaires en suspension (SPM) et une forte quantité de monoxyde de carbone qui sont des polluants omniprésents aux propriétés toxiques et cancérigènes [3]. En outre, nous remarquons également une forte expansion de la population qui engendre une supériorité importante de la demande du combustible sur l'offre et ce déséquilibre est à l'origine d'une crise à la fois environnementale, économique et sanitaire [4]. Avec une demande qui croît de jour en jour, nous risquons d'assister à une pénurie de cette denrée énergétique qu'est le bois dans un futur très proche pénalisant ainsi le bien-être et l'épanouissement des générations futures [5]. C'est donc dans l'optique de résoudre cette situation critique qu'un bon nombre de personnes prévenantes ont mis sur pied les fours améliorés qui sont des fours ayant des rendements énergétiques plus élevés que le foyer traditionnel. Les premières tentatives d'amélioration des fours traditionnels à biomasse solide ont été faites en Inde dans les années 1950. Ces fours étaient conçus avec une cheminée pour évacuer la fumée des cuisines. Dans les années 1970, la crise pétrolière a ramené les questions

énergétiques au premier plan des préoccupations et les programmes de fourneaux améliorés ont été considérés comme une solution à la crise du bois de chauffage, à la déforestation et à la désertification dans le monde entier [1]. En 2012, les travaux de Saidur et al. [6] ont permis une évaluation de l'énergie des différentes biomasses utilisées comme combustibles dans les fours. En outre, Tyagi et al. [7] ont évalué de manière expérimentale les performances de quatre types de foyers métalliques et après comparaison de ces performances, ils ont conclu que c'était le foyer envirofit qui avait le meilleur rendement énergétique et exergetique. Panwar [8] a effectué une analyse énergétique et exergetique des fours améliorés à une et à deux marmites et a pu démontrer que celui à deux marmites était le plus efficace en termes d'économie de combustibles. En 2018, Sagouong et Tchuen [5] ont fait une étude comparative sur la modélisation mathématique de trois fours traditionnels en utilisant la méthode d'approche du réseau thermique qui est la méthode que nous allons utiliser dans ce travail lors de la modélisation.

Dans la même lancée de participer à la résolution de cette situation critique, nous nous posons la question de savoir : Comment s'y prendre pour davantage réduire l'utilisation abusive du bois comme combustible ? Pour répondre à cette question, l'objectif principal de ce mémoire consistera à l'optimisation du rendement énergétique du four amélioré étudié. Dès lors, nous avons travaillé selon les objectifs spécifiques suivants à savoir la détermination des équations régissant le fonctionnement du four étudié, l'obtention des différentes températures des parties du système thermique (four et marmite) et l'évaluation du rendement énergétique pour finir l'optimisation du rendement énergétique. Pour donc atteindre cet objectif général, nous orienterons cette recherche sur trois grandes parties :

- Après le résumé et l'introduction générale, nous aurons le premier chapitre intitulé revue de la littérature qui sera centré sur les généralités des fours améliorés.
- Le second chapitre intitulé Matériel et méthodes s'axera pour sa part sur la modélisation des fours améliorés plus principalement le four à double parois qui est le four d'étude par la méthode d'approche du réseau thermique au travers de laquelle nous avons obtenu les équations du système thermique qui ont été implémentées sous Matlab pour l'obtention de nos résultats.
- Le troisième chapitre présentera les résultats de la simulation du four et les discussions sur les résultats obtenus et par la suite s'en suivront la conclusion générale et les perspectives.

Chapitre I: Revue de la littérature

Introduction

Au Cameroun, près de 70% de la population utilisent généralement du bois et du charbon de bois pour la production de l'énergie pour la cuisson. La combustion de ces carburants a généralement lieu dans des cuisinières ouvertes traditionnelles avec peu ou pas de moyens de ventilation émettant des fumées contenant des substances toxiques qui nuisent à la santé humaine. Etant donné que, la population va de plus en plus grandissante, la quantité de la demande en combustibles sur l'offre s'accroît aussi, il faudra donc se pencher sur des fours économes de combustibles à savoir les fours dits améliorés dont leur vulgarisation dans ce pays entraînerait la résolution des problèmes mentionnés plus haut. Dans ce chapitre, nous présenterons dans un premier temps la situation énergétique du Cameroun ensuite nous continuerons par une généralité sur les fours de cuisson améliorés ; pour enfin terminer par les différentes sources énergétiques utilisées par ceux-ci.

I.1. Présentation de la situation énergétique du Cameroun

Pays d'Afrique centrale, le Cameroun est situé au fond du golfe de Guinée et limité au Nord par le Tchad, à l'Est par la république centrafricaine, au Sud par le Congo, le Gabon et la Guinée équatoriale et à l'Ouest par le Nigéria. Doté d'une superficie totale de 475650 Km², le Cameroun renferme plusieurs ressources énergétiques telles que le gaz naturel, l'énergie hydroélectrique et d'autres énergies renouvelables (Solaire, Biomasse, éolien) importantes. La production d'énergie primaire était répartie en 2019 entre biomasse (53%), hydroélectricité (3,5%) et combustibles fossiles (43,2%), dont pétrole 28,3% et gaz naturel 14,8%. L'énergie primaire consommée dans le pays se répartissait en 71,1 % de biomasse, 4,6% d'hydroélectricité et 24,3% de combustibles fossiles (produits pétroliers et gaz) [9].



Figure I.1: Carte du Cameroun [10]

I.2. Ressources énergétiques fossiles ou non-renouvelables

Ce pays possède des gisements de gaz naturel aujourd'hui estimés à 6.6 TCF soit environ 186 Milliards de m^3 . Le gouvernement vise à moderniser et à accroître les capacités des infrastructures de raffinage et de stockage des produits pétroliers. Ils ont également mis sur pied la construction de nouvelles capacités de stockage dans certaines régions du pays.

- **Pétrole brut**

Dans les années 1980, les réserves du pétrole étaient de l'ordre de 1015 millions de barils mais au fur et à mesure que les années se succèdent, ces réserves diminuent et n'étaient plus que de 400 millions de barils au début de 1999 à cause de son utilisation progressive. La production pétrolière du Cameroun en 2010 a été d'environ 3.3 millions de tonnes. La société TOTAL Exploration-Production reste le plus gros producteur avec 61% des parts. Entre 2001

et 2010, la production pétrolière du Cameroun a chuté de plus de 40%. En 2010, seulement 12% de la production pétrolière ont été transformées localement par la SONARA [11].

- **Gaz naturel**

Les réserves prouvées de gaz au Cameroun sont estimées à 157 milliards de m³ d'après la société Nationale des hydrocarbures (SNH), ce gaz n'est pas encore exploité. Le Cameroun dispose des réserves gazières de l'ordre de 570 milliards de m³ dont 157 déjà prouvées d'après la société nationale des hydrocarbures. Un projet est en cours pour son exploitation et permettra de produire de l'électricité grâce à la centrale thermique à gaz de Kribi, de distribuer du gaz aux industries de Douala et améliorer l'offre de gaz domestique [11].

I.3. Ressources énergétiques renouvelables

Les ressources énergétiques renouvelables au Cameroun comprennent l'hydroélectricité, l'énergie solaire, le bois et bien d'autres.

- **Energie solaire**

Ce pays possède un potentiel d'insolation abondant et disponible mais très faiblement exploité. L'insolation moyenne dans la partie Nord du pays est de 5.8kwh/m² par jour et dans la partie Sud, on observe une insolation de 4 kWh/m²/j d'où une insolation moyenne de 4.9 kWh/m² pour l'ensemble du pays.

- **Hydroélectricité**

Le Cameroun dispose des ressources considérables en hydroélectricité, importantes en énergies renouvelables et modestes en hydrocarbures. En matière d'électricité, le Cameroun possède le second potentiel hydroélectrique en Afrique Sub-Saharienne, estimé à environ 20 GW, soit plus de 115 milliards de kWh que le pays pourrait produire chaque année en valeur. Les équipements de production sont hydrauliques et thermiques et la puissance totale installée est d'environ 928 MW, dont 723 MW pour les trois centrales hydrauliques et 205 MW pour les 39 centrales thermiques et estimée à 1291 MW en 2013 [11].

- **Bois-énergie**

Le bois-énergie, en milieu rural comme en milieu urbain, reste le premier vecteur énergétique au Cameroun. En 2010, il représentait 72,6% de la consommation totale d'énergie

contre 20,1% pour les produits pétroliers et gaziers et 7,3% pour l'électricité [11]. En effet, la consommation d'énergie domestique pour la cuisson est constituée de près de 82,3% de bois de feu ;30,6% de charbon de bois et 27% de gaz selon une enquête menée par le ministre de la protection de la nature en 2012. Le coût élevé du gaz domestique oblige les ménages à se servir du charbon ou encore du bois en substitut d'après la même enquête. De ce point de vue, le rapport y afférent précise qu'une bouteille de gaz domestique de cinq kilogrammes coûte 6000 francs CFA. Ainsi, une famille de quatre personnes utilisera environ deux bouteilles de gaz par mois soit un budget de 12000 francs CFA. Mais, Si la même famille décide de cuisiner au bois, elle ne dépenserait que 3000 francs CFA par mois d'où l'adoption énorme de la population camerounaise à faible revenu mensuel pour cette source énergétique. Selon la même enquête à cause de cette forte utilisation du bois <<le Cameroun a été classé au 15^{ème} rang mondial des pays les plus affectés par la déforestation avec environ 400 000 hectares déboisés entre 1990 et 2005 sur 23,9 millions d'hectares de forêt disponible >>détaille le rapport du ministère de la protection de la nature en se référant à l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

I.4. Généralités sur les fours améliorés

Tout d'abord, le terme four fait référence à un appareil qui génère de la chaleur à partir d'un vecteur énergétique et met cette chaleur à disposition pour l'utilisation prévue dans une application spécifique. Les fours sont conçus pour transférer la chaleur générée par les diverses sources énergétiques aux aliments dans le but de les faire cuire, affiner etc... Ainsi, un four présente la combinaison de la génération de chaleur et du transfert de chaleur vers une marmite si les aliments sont cuits dans un liquide ; ou une plaque chauffante, si les aliments sont cuits sur une surface chaude. Le plus ancien des fours à bois est le four à trois pierres qui s'obtient par la disposition de trois pierres de telle sorte que l'on puisse placer une marmite au-dessus. Selon certaines études, le taux de pollution de l'air abritant ces foyers qui brûlent de la biomasse s'élève à 10000 µg/m³, étant de 50 fois supérieur au niveau d'exposition des habitations recommandées par l'OMS (Organisation Mondiale de la santé) et exposant les femmes et les enfants à de troubles sérieux de la santé [12] . Ils consomment également du combustible de manière abusive et avec la population qui augmente rapidement, cela contribuera à un déséquilibre entre la demande de bois comme combustible et l'offre d'où la naissance des fours améliorés pour palier à ces problèmes .

I.4.1. Définition des fours améliorés



Figure I.2 : Image d'un four amélioré [13]

Le four dit amélioré renvoie tout simplement à ce dispositif de cuisson des aliments construit pour utiliser les mêmes combustibles que les foyers ouverts traditionnels, mais particulièrement économes en combustible et moins polluants pour la santé. Il possède également une meilleure efficacité énergétique par rapport aux fours traditionnels à trois pierres et s'il est bien utilisé, il peut économiser jusqu'à 60% de combustible. Il minimise la génération de produits de combustion incomplète dont beaucoup ont un fort potentiel de réchauffement. Il n'y'a pas encore de statistiques officielles sur le nombre de ménages qui utilise les foyers améliorés au Cameroun, mais les prémices d'une prise de conscience de la nécessité de préserver l'environnement sont déjà là car bon nombre de femmes camerounaises utilisent les foyers culinaires améliorés en réponse à la protection de la nature et la lutte contre la déforestation [14].

I.4.2. Caractéristiques des fours améliorés

Facile à construire et avec des matériaux locaux, ces fours présentent plusieurs avantages dans les domaines tels que : la fonctionnalité, l'économie, la santé, l'environnement, l'esthétique et le coût.

a) Fonctionnalité

En ce qui concerne la fonctionnalité de ces foyers améliorés, ils sont plus efficaces par rapport au foyer traditionnel à trois pierres en termes de rétention et de direction de la quantité de chaleur fournit lors de la combustion du combustible avec une récupération de 40 à 70% de l'énergie produite favorisant ainsi, un temps de cuisson rapide des repas. Ils sont également faciles à allumer et la quantité de flamme peut être contrôlée par le nombre de combustible que l'on augmente ou diminue dans la chambre de combustion du four ce qui favorise son adaptation pour la cuisson de tout type de repas.

b) L'économie

En effet, ces fours utilisent moins de combustibles que le four à trois pierres en économisant entre 42 et 62% de combustibles pour la cuisson des repas .Cette économie de combustible favorise une économie significative d'argent au niveau de chaque ménage ce qui permettra aux familles concernées de pouvoir convertir ces épargnes dans d'autres activités génératrices de revenus. Une étude réalisée par Barnes s'est concentrée sur l'Afrique subsaharienne urbaine où l'argent économisé grâce à la réduction de la consommation de combustible des fours à charbon améliorés représentait 5 % à 22 % du revenu d'une famille [15]. En outre, nous notons également une économie en temps de collecte du bois pour les personnes impliquées dans la recherche de bois comme combustibles. L'étude effectuée précédemment par Barnes a estimé que dans les zones de collines du Népal rural, les femmes dépensaient environ par an pour cuisiner 2,5 - 3,6 heures par jour à collecter du bois de chauffage.

c) La santé

Comparativement au foyer traditionnel à trois pierres qui produit beaucoup de fumées et cause de nombreux problèmes de santé, le four amélioré va produire très peu de fumée lors de son fonctionnement assurant l'hygiène des maisons et par conséquent la réduction des problèmes de santé tels que les troubles respiratoires, maux de tête, rhume, mal d'yeux ceci pour favoriser une augmentation de l'espérance de vie des membres de famille concernés.

d) L'esthétique et le coût

De prix abordable et variable, il est accessible même aux ménages à faible revenu et son côté esthétique varie selon sa forme. Il est moins salissant que le four traditionnel à trois pierres et apporte donc un certain confort aux familles qui l'utilisent.

e) L'environnement

Par ailleurs, l'économie de combustible entraîne une réduction de la déforestation allant jusqu'à 50% pour la production de bois comme combustible ce qui est pour nous une contribution significative dans la préservation de l'environnement et la réduction des gaz à effet de serre limitant ainsi l'érosion des sols [16].

I.5. La physique fondamentale régissant le transfert de chaleur dans les fours améliorés

Les principes physiques qui régissent le comportement des fours sont ancrés dans la thermodynamique, expliqués par les principes de transfert de chaleur et influencés par les différentes géométries des cuisinières. Pour commencer à comprendre les principes du transfert de chaleur, la figure suivante nous présente les trois modes de transfert de chaleur qui jouent un rôle dans les performances du four.

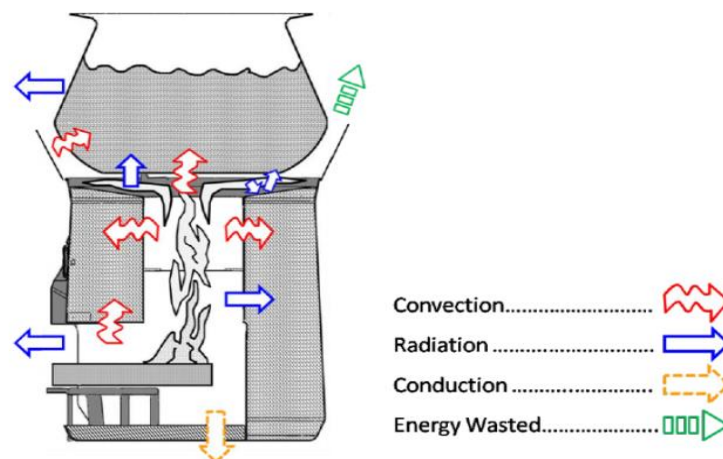


Figure I.3: Schéma de la section du four avec les modes de transfert de chaleur [17]

I.5.1. Les modes de transfert de chaleur

Pour modifier la température d'un objet, l'énergie est requise sous la forme de la production de chaleur pour augmenter la température ou l'extraction de la chaleur pour réduire la température. Pour maintenir une température donnée considérable, l'énergie continue est nécessaire ainsi que l'isolation pour réduire les pertes énergétiques. La chaleur peut être transférée selon trois mécanismes :

- **Par conduction**

La conduction est le transfert de chaleur d'une partie d'un corps à une autre partie de ce même corps ou alors c'est le transfert de chaleur d'un corps à un autre en contact physique sans déplacement appréciable des molécules formant ces corps. Des exemples de ce mode de transfert de chaleur seraient de placer votre main contre une fenêtre ou placer le métal dans une flamme ouverte.

- **Par convection**

La convection est le transfert de chaleur dans un fluide par le mélange d'une partie du fluide avec un autre. Le mouvement du fluide peut être causé par les différences de densité résultant des différences de température comme dans la convection naturelle (convection libre), ou alors ce mouvement du fluide peut être produit par des moyens mécaniques comme dans la convection forcée.

- **Par rayonnement**

Le rayonnement électromagnétique est généré par l'émission des ondes électromagnétiques. Ces ondes portent l'énergie loin de l'objet émetteur. Tous les matériaux rayonnent de l'énergie thermique en fonction de leur température. Si deux corps à des températures différentes sont placés de telle sorte que le rayonnement de chaque corps soit intercédé par l'autre alors le corps ayant la température la plus basse recevra plus d'énergie qu'il rayonne et donc son énergie interne augmentera et l'énergie interne du corps à la température la plus élevée diminuera. Il y'a donc un transfert net d'énergie du corps à basse température à raison de la différence de température entre ces deux corps. L'énergie rayonnante ne nécessite aucun milieu pour sa propagation car il se propage même dans le vide.

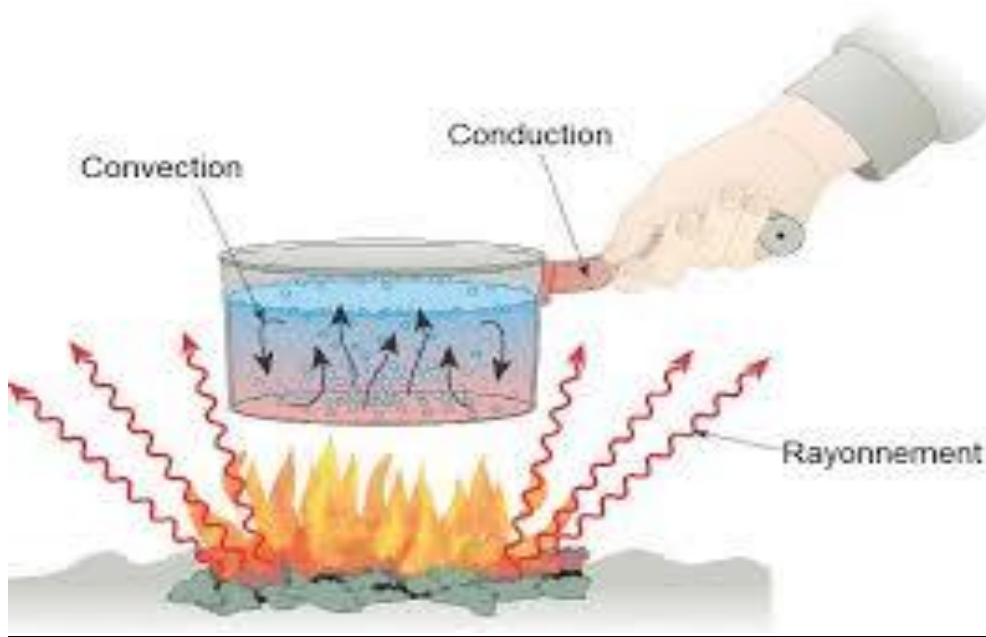


Figure I.4:les trois modes de transfert de chaleur [18]

I.6. Quelques exemples de fours améliorés

I.6.1. Four Rocket



Figure I.5: Four amélioré Rocket [19]

Ce type de foyers améliorés utilise uniquement le bois comme combustible et est économe par rapport au four traditionnel à 3 pierres avec une efficacité énergétique de 19-22%.

Il est fabriqué avec de l'argile, de paille, de cendre et de fumier ayant un prix de fabrication se situant entre 1500-5000 selon la taille du four [19].

I.6.2. Four à simple paroi



Figure I.6: Four simple paroi [19]

De dimensions variables et fait de métal, ce four utilise le bois comme combustible et permet d'économiser environ 22 à 49 % de combustible pour le test d'ébullition de l'eau par rapport au four à 3 pierres avec un prix d'achat allant de 3500-6000frs. Ils sont accessibles dans nos différents marchés [19].

I.6.3. Four Nansu



Figure I.7 : Foyer amélioré Nansu [19]

Ce foyer est constitué de métal et d'argile. Il utilise uniquement le charbon comme combustible favorisant une économie d'énergie allant jusqu'à 17% pour le test d'ébullition de l'eau comparé au foyer à 3 pierres avec un prix d'achat allant de 3500 à 4000frs [19].

I.6.4. Four à double paroi

De dimensions variables, le four à double paroi est confectionné de manière artisanale à partir de métal avec un ajout d'argile ou de sable dans la cloison séparant les murs interne et externe du four. C'est un four mixte utilisant le bois et le charbon de bois comme combustibles et qui favorise ainsi une économie de combustibles allant jusqu'à 52% par rapport au four traditionnel à 3 pierres selon le test de cuisine contrôlé du riz. De plus, il possède une efficacité énergétique de 24% avec un prix d'achat allant de 6000 à 12000 FCFA [19].



Figure I.8: Four amélioré double paroi [19]

I.7. Principales sources énergétiques utilisées

En général, les différents fours améliorés que nous utilisons consomment le bois et le charbon de bois pour la cuisson des aliments.

I.7.1. Propriétés énergétiques, physiques et chimiques du bois

Le bois peut se définir comme un ensemble de tissu végétal qui assure plusieurs fonctions dans l'arbre et qui est utilisé comme combustible dans les fours [20].



Figure I.9: Bois de chauffage [21]

a) Propriétés énergétiques du bois

Le contenu énergétique du bois est exprimé par son pouvoir calorifique. Il représente la chaleur dégagée par sa combustion complète. Lorsque le bois brûle, l'eau qu'il contient se dégage sous forme de vapeur avec les fumées. Une partie de l'énergie produite au sein du foyer va être utilisée pour transformer cette eau en vapeur. Pour ne pas biaiser l'évaluation du contenu énergétique d'un combustible en tenant compte de cette perte énergétique difficilement exploitable (sauf dans le cas des dispositifs spéciaux des chaudières à condensation), on parle alors de pouvoir calorifique inférieur (PCI).

$$PCI = \left[\begin{array}{l} \text{Contenu énergétique total} \\ \text{du combustible (PC supérieur)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Contenu énergétique de la vapeur d'eau} \\ \text{émise lors de sa combustion complète} \end{array} \right] \quad (I.1)$$

Le pouvoir calorifique est exprimé en Mégajoules par kilogramme (MJ/kg). Le PCI du bois anhydre (c'est-à-dire contenant 0% d'eau), et dépourvu de matière minérale, est relativement constant, de l'ordre de 18,4 MJ/kg et ce, quelle que soit l'essence (résineux ou feuillus) [22]. C'est aussi un facteur qui fait varier le rendement énergétique.

- **La densité**

La connaissance de la densité du bois est très utile parce qu'elle nous renseigne sur d'autres propriétés fondamentales, notamment sur la dureté et la résistance à la compression. Il faut distinguer entre la densité réelle ou absolue du bois (qui est la densité de la matière ligneuse) et la densité apparente de la masse du bois.

- **L'homogénéité**

Du point de vue purement anatomique, nous disons qu'un bois est homogène lorsque les différents tissus (vaisseaux et fibres notamment) sont uniformément répartis dans la masse. Les bois qui présentent une répartition uniforme des vaisseaux sensiblement égaux dans toute l'épaisseur d'une couche annuelle et aussi d'une couche annuelle à une autre est homogène.

- **L'humidité**

Le taux d'humidité dans le bois est variable d'une espèce à une autre, des conditions climatiques et du moment d'abatage. L'humidité relative (HR) exprimée en % représente la quantité d'eau contenue dans le bois par rapport à sa masse humide ou sèche. En pratique, on exprime l'humidité relative sur base humide.

$$HR_{\text{base humide}} (\%) = \frac{\text{Contenu en eau du bois (kg)}}{\text{masse totale du bois+eau (kg)}} * 100 \quad (\text{I.2})$$

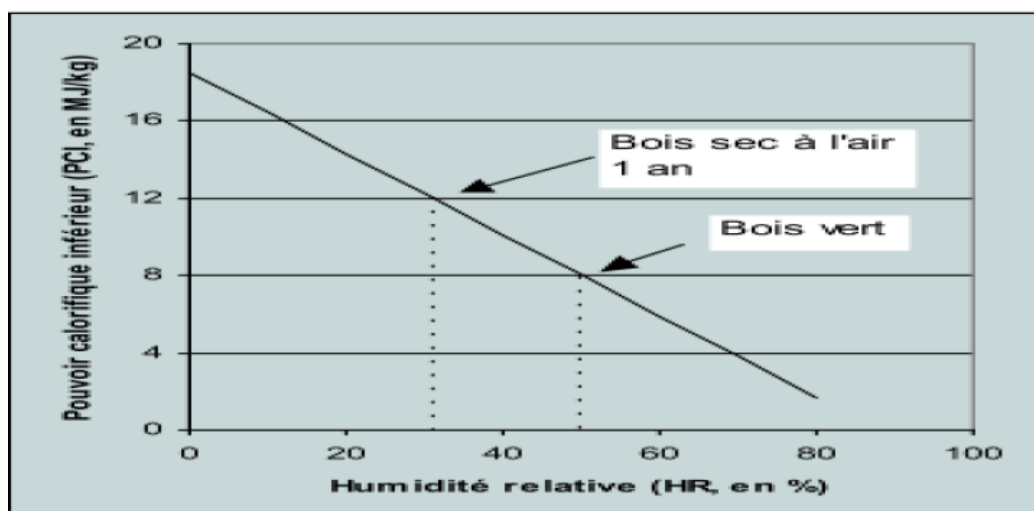


Figure I.10: Évolution du PCI en fonction de l'humidité relative [22]

Le bois vert contient environ 50 % d'eau. Après séchage, la teneur en eau du bois se stabilise et elle est en équilibre avec celle de l'air et atteint environ 20 % pour un séchage à l'air libre. L'évaporation de l'eau demande de l'énergie ; la valeur énergétique du bois sera donc d'autant plus faible que celui-ci contient de l'eau. Le PCI du bois diminue lorsque son humidité augmente.

b) Propriétés physiques du bois

Le bois sec est principalement composé de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote. Il présente également un faible taux de matières minérales qui constituent les cendres. Les proportions des différents composés sont variables d'une essence à l'autre. Les résultats de l'analyse ultime réalisée au laboratoire donnent comme valeurs : 50 à 53% de carbone (C), 38 à 42% d'oxygène (O), 5 à 10% d'hydrogène (H), 0,1 à 0,3% d'azote (N) et 0,08 à 0,2% de soufre (S) [23]. La forte teneur en oxygène du bois entraîne une diminution de son pouvoir calorifique par rapport à celui des combustibles fossiles. Le bois contient très peu d'azote et seulement des traces de soufre (au contraire des combustibles fossiles). Sa teneur en cendres est faible en comparaison à celle des autres biomasses et des charbons minéraux : le taux de cendres des déchets agricoles s'étale entre 10 et 15% et celui des charbons minéraux peut atteindre 20% [22]. La composition des cendres du bois varie également en fonction de l'essence, mais les principaux constituants restent le calcium, le potassium, le magnésium et le sodium.

c) Composition chimique du bois

Le bois est composé de différents types de tissus végétaux : tissu vasculaire, fibres, parenchymes de réserve. Les fibres sont les faisceaux de cellules résistantes, disposées dans le sens axial, qui assurent la rigidité et la résistance mécanique du bois. Rousset [23] a décrit précisément la structure des trois polymères principaux composant le bois. Il s'agit de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine, qui sont étroitement liées.

- **La cellulose** qui constitue la paroi des cellules, est le composé majeur du bois. Elle représente 40 à 50% de sa masse totale. C'est un polymère de glucose (polysaccharide) de formule générale $(C_6H_{10}O_5)_n$. Elle est formée d'une longue chaîne dont le degré de polymérisation peut atteindre 3000 pour le bois. La chaîne, dont le motif répétitif est la cellobiose (Figure I.10), a une structure linéaire qui confère au bois son caractère fibreux.
- **Les hémicelluloses** comptent pour 15 à 25% dans la masse totale du bois. Ce sont également des polysaccharides, mais de structure plus complexe que la cellulose. Les polymères sont formés de différents types de monomères et leur composition est variable en fonction des espèces. Lors de la pyrolyse, les hémicelluloses sont les premières à être dégradées : elles présentent une très forte instabilité thermique.
- **La lignine** constitue la matrice rigide du bois, qui représente 20 à 30% de sa masse totale. Elle résulte de la polymérisation de trois alcools phénoliques et présente une

masse moléculaire élevée. La structure de la lignine est complexe et encore mal connue à ce jour, en raison de la difficulté à l'isoler des autres composés du bois sans la dégrader. C'est le composé le plus stable thermiquement.

En effet, la connaissance des propriétés physiques est importante car celles-ci peuvent influencer significativement la performance du bois lors de son utilisation [22]. Grâce à ses nombreuses propriétés qu'il renferme, le bois est aujourd'hui très utilisé dans le monde aussi bien pour des usages domestiques qu'industriels. Le pouvoir calorifique du bois contenant 25% d'humidité est de 3.5 kWh par kilo de pouvoir calorifique et pour des buches de 20% d'humidité ont un pouvoir calorifique de 3.8 kWh par kg soit entre 1500 et 2000 kWh par stère [24].

I.7.2.Le charbon de bois



Figure I.11: Charbon de bois [25]

Le charbon de bois est produit en chauffant du bois en l'absence du dioxygène jusqu'à ce que de nombreux composants organiques se gazéifient, laissant derrière eux un résidu noir poreux à haute teneur en carbone avec un pouvoir calorifique de 31-35 MJ/Kg en fonction de sa teneur en substances volatiles [26]. Il est utilisé comme combustible pour cuisiner en plein air dans les pays en développement à cause du fait qu'il est moins salissant et plus facile à utiliser que le bois. Avec une accessibilité facile et un coût moindre, le charbon est produit à petite échelle et requiert beaucoup de travail. Bien que le bois soit le combustible le plus abondant, il est possible de produire du charbon avec d'autres sources de combustibles y

compris les déchets agricoles tels que les tiges de millet, les épis de maïs, les coquilles de noix de coco... Ces matériaux de biomasse sont constitués de cellulose, de lignine, de substances volatiles et de l'eau. Lors du processus de production, lorsque les substances volatiles sont expulsées, la cellulose et la lignine se décomposent. Le processus d'obtention du charbon se divise dans les étapes suivantes :

- Combustion,
- La déshydratation,
- La réaction exothermique,
- Le refroidissement [27].

Le charbon de bois possède également plusieurs propriétés physiques et chimiques. Ses propriétés physiques ont une grande importance dans la sidérurgie au charbon de bois car elles influencent le rendement du haut fourneau. Le charbon sidérurgique doit donc avoir :

- Une bonne résistance à la compression pour résister à l'effort d'écrasement dans la charge du haut fourneau.
- La résistance à la fragmentation aux cours des manipulations est importante pour maintenir une perméabilité constante de la charge au vent chaud pour garantir le rendement et la régularité de marche du haut fourneau.

Comme propriétés chimiques, nous pouvons citer la teneur en humidité, matières volatiles autres que l'eau, la teneur en carbone pur et la teneur en cendres [28].

Conclusion

Dans ce chapitre où il était principalement question de présenter la situation énergétique au Cameroun, de donner les généralités sur les fours améliorés et leurs caractéristiques, il en ressort que les fours améliorés sont des fours ayant un rendement énergétique plus important et favorisant une meilleure combustion avec les mêmes combustibles que les fours traditionnels à trois pierres. Ils possèdent plusieurs caractéristiques et propagent de la chaleur selon trois modes à savoir la conduction, la convection et le rayonnement lors de leur fonctionnement. En outre, il existe plusieurs types de fours améliorés dont le foyer Nansu, le foyer Rocket, le foyer simple paroi et le foyer double paroi et bien d'autres. Toutefois, cette étude portera essentiellement sur le four à double paroi.

Chapitre II: Matériel et méthodes

Introduction

Dans le but d'économiser et de gérer rationnellement la consommation énergétique des fours, les recherches se focalisent actuellement sur leur optimisation qui passe par la modélisation et la simulation de leur système énergétique. Dans le cadre de ce travail, l'objectif principal est de réduire davantage l'utilisation du bois comme combustible tout en optimisant le rendement énergétique du four étudié. Pour mener à bien cet objectif, nous allons présenter dans cette partie les outils nécessaires ainsi que la méthode de modélisation utilisée dans ce travail.

II.1. Présentation du logiciel Matlab

Le logiciel Matlab est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant l'écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique. Il fonctionne sous Windows et sous linux. L'interface de manipulation Matlab peut changer légèrement mais les points centraux resteront identiques. Cette interface est divisée en plusieurs sections dont :

- Command Windows,
- Workspace ou Mémoire de travail,
- Command History ou Historique,
- Current Folder,
- Help,
- Editor.

II.2. Présentation du four choisi

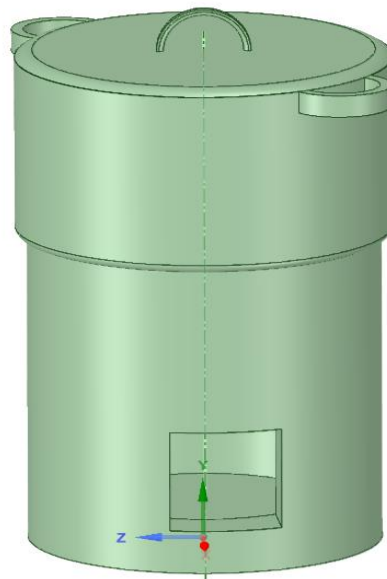


Figure II.1: Présentation du four étudié

Cette figure présente le four amélioré deux parois qui fera l'objet de notre étude. Ce four est constitué par l'emboîtement de deux parois cylindriques métalliques avec un espace isolant entre les deux, qui minimise la dispersion de chaleur vers l'extérieur du four. Cette conception du four permet de réduire la consommation d'énergie et d'accélérer le temps de cuisson des repas. Le métal utilisé pour les parois ici est le fer et l'isolant entre les deux parois c'est du sable.

II.2.1. Géométrie du modèle

La figure précédente est subdivisée ainsi que suit :

- Une porte d'entrée du combustible : C'est à ce niveau que le combustible est introduit dans le four pour la combustion. Elle débouche dans la chambre de combustion inférieure.
- La chambre de combustion inférieure : Ici, le combustible est consumé et les gaz de combustion ainsi que la flamme produite passent dans la chambre de combustion supérieure.
- La chambre de combustion supérieure : Encore appelée le corps du four, c'est au travers de cette zone que passent les gaz chauds et la flamme pour entrer en contact avec la marmite.

Les dimensions du four et de la marmite sont représentées dans les tableaux suivants.

Tableau II. 1: Dimensions du four étudié

Description du four	Valeur numérique en (m)
Hauteur	0,50
Diamètre intérieur	0,38
Diamètre extérieur	0,44
Porte d'entrée du combustible	0,14*0,14
Epaisseur	0,03

Tableau II. 2: Dimensions de la marmite

Description de la marmite	Valeur numérique en (m)
Hauteur	0,25
Diamètre intérieur	0,42
Diamètre extérieur	0,44
Diamètre du couvercle	0,44
Epaisseur de la marmite	0,01

II.2.2. Principes de la modélisation mathématique

Lorsqu'un four fonctionne, la physique de base qui se produit intérieurement est le transfert de chaleur et l'écoulement des fluides. Même si la modélisation mathématique du four de cuisine doit représenter la situation réelle avec une certaine précision, il faudra travailler selon des hypothèses simplificatrices dans l'optique de simplifier la modélisation. Après avoir subdivisé notre système thermique qu'est le système (Four et Marmite) en plusieurs sous volumes selon la méthode d'approche du réseau thermique, des hypothèses ont été adoptées telles que :

- La chaleur produite par le combustible agit à l'entrée ;
- La chaleur produite par la source de chaleur (feu) sert à augmenter premièrement la température du corps chaud et deuxièmement celle des composants du système thermique ;

- Chaque partie du système (Four et marmite) est considérée comme un point nodal et isotherme [29] ;
- La température ambiante et l'énergie produite par la source de chauffage ne sont pas dépendantes du temps [5].

II.2.3. Méthode d'approche du réseau thermique

a) Définition

La méthode d'approche du réseau thermique est une méthode de modélisation utilisée pour étudier les transferts de chaleur à l'intérieur d'un four. Cette méthode consiste à subdiviser le four en différents éléments appelés nœuds, qui sont reliés entre eux par des éléments de liaison appelés branches. Chaque nœud du réseau thermique représente une zone du four avec des caractéristiques thermiques homogènes. Les branches quant à elles représentent les flux de chaleur qui circulent entre les différents nœuds du réseau. Les équations thermiques sont résolues pour chaque nœud afin de déterminer les flux de chaleur traversant les branches. Cette méthode permet de modéliser de manière précise et détaillée les transferts de chaleur à l'intérieur du four, en prenant en compte les caractéristiques des matériaux utilisés, la distribution de la source de chaleur, la température ambiante etc...

b) Application

Afin de constituer le réseau thermique du four, nous avons subdivisé le système thermique (four et marmite) en 9 nœuds isothermes. Le réseau thermique a été développé en considérant le flux de chaleur entre chaque combinaison de nœuds. Le schéma ci-dessous présente les différentes températures de chaque nœud de ce système thermique. La numérotation et la définition des différents nœuds de ce système sont indiquées dans le tableau II.3. Il contient les explications sur les températures des différents nœuds du système thermique (Four et Marmite).

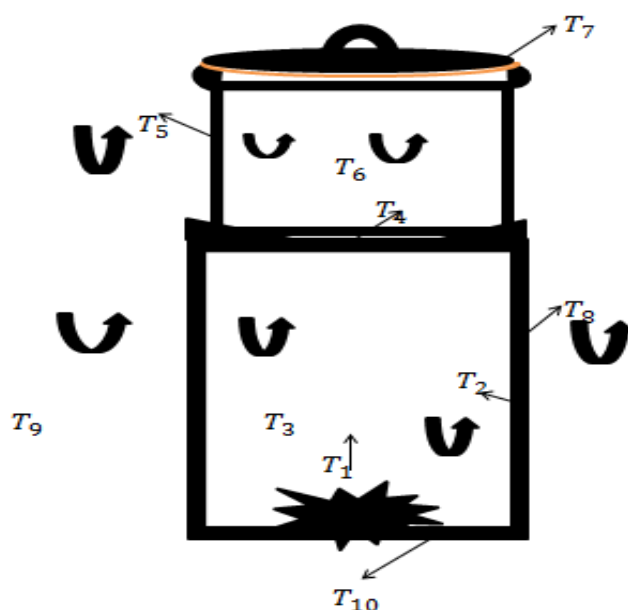


Figure II.2: Schéma représentatif des différentes températures du système thermique

Tableau II. 3: Description de la température des différents nœuds

Nœuds	Description	Température
1	Température de la Source de chaleur (combustible)	T_1
2	Température du mur interne du four	T_2
3	Température de l'air dans le four	T_3
4	Température à la base de la marmite	T_4
5	Température des murs de la marmite	T_5
6	Température à l'intérieur de la marmite	T_6
7	Température du couvercle de la marmite	T_7
8	Température du mur externe du four	T_8
9	Température ambiante de l'air	T_9
10	Température à la base du four	T_{10}

Entre les différents nœuds du système figure une résistance thermique qui exprime le type de transfert de chaleur ou relations de liaisons thermiques (relation liant les différentes températures de chaque nœud) existant entre ces nœuds. L'évaluation des différents transferts de chaleur (soit par conduction, par convection ou rayonnement) entre ces différents nœuds nous serviront pour pouvoir représenter le modèle de réseau thermique.

Au nœud 1:

$$1) Q_{1.2} + Q_{1.3} + Q_{1.4} + Q_{1.10} = 0 \quad (\text{II.1})$$

Au nœud 2:

$$2) Q_{2.1} + Q_{2.3} + Q_{2.4} + Q_{2.8} = 0 \quad (\text{II.2})$$

Au nœud 3:

$$3) Q_{3.1} + Q_{3.2} + Q_{3.4} = 0 \quad (\text{II.3})$$

Au nœud 4:

$$4) Q_{4.1} + Q_{4.2} + Q_{4.3} + Q_{4.5} + Q_{4.6} + Q_{4.7} + Q_{4.8} = 0 \quad (\text{II.4})$$

Au nœud 5:

$$5) Q_{5.4} + Q_{5.6} + Q_{5.7} + Q_{5.9} = 0 \quad (\text{II.5})$$

Au nœud 6:

$$6) Q_{6.4} + Q_{6.5} + Q_{6.7} = 0 \quad (\text{II.6})$$

Au nœud 7:

$$7) Q_{7.6} + Q_{7.5} + Q_{7.4} + Q_{7.9} = 0 \quad (\text{II.7})$$

Au nœud 8:

$$8) Q_{8.9} + Q_{2.8} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Où $Q_{i,j}$ représente le flux de chaleur du nœud i au nœud j et ce flux de chaleur entre les différents nœuds peut être décrit en termes de différence de température $(T_i - T_j)$ et de la résistance équivalente entre les nœuds $Re_{i,j}$ selon cette formule :

$$Q_{i,j} = \frac{(T_i - T_j)}{Re_{i,j}} \quad (\text{II.9})$$

Le flux de chaleur entre les nœuds peut être une combinaison des trois modes de transfert de chaleur : conduction, convection et rayonnement. Par conséquent, la résistance équivalente est obtenue en considérant ces trois modes pour les nœuds spécifiques. La figure suivante présente le modèle du réseau thermique de notre système (four et marmite) où les

différents nœuds sont interconnectés entre eux par les résistances thermiques qui correspondent à un type particulier de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) comme dans le travail de Mulu Bayray [29].

c) Schéma du réseau thermique du four d'étude

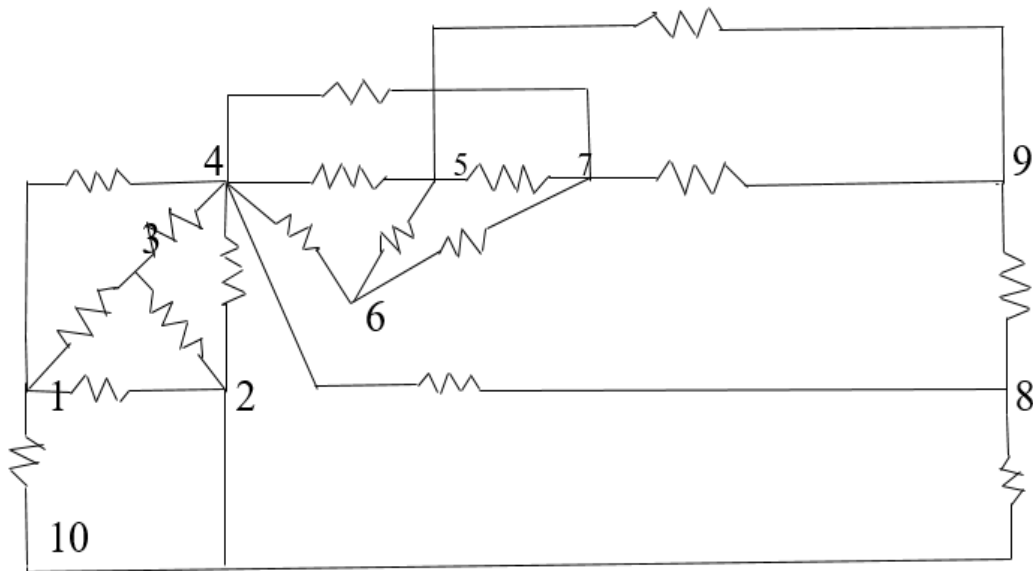


Figure II.3: Réseau thermique du système (Four et Marmite)

II.3. Bilan d'énergie

Il existe différents flux de chaleur qui influent sur l'état d'un système thermique à savoir le flux de chaleur entrant (φ_e), le flux généré (φ_g), le flux sortant (φ_s) et le flux de chaleur stocké (φ_{st}). Pour établir le bilan d'énergie d'un système, il faut utiliser la première loi de la thermodynamique :

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st} \quad (\text{II.10})$$

II.3.1. Expression des flux d'énergie

Il faut établir les expressions des différents flux d'énergie de sorte qu'en reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, on obtiendra plusieurs équations dont la résolution permettra de connaître l'évolution de la température dans chaque point du système thermique.

a) La conduction

La conduction représente le processus de propagation de la chaleur par le contact direct entre les particules du corps dont les différentes parties ne sont pas isothermes. Ainsi, lorsqu'il existe dans un milieu un gradient de température, il s'ensuit un transfert de chaleur exprimé par la loi de Fourier :

$$\vec{\phi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{II.11})$$

Où λ est la conductivité thermique du milieu (mesure de l'aptitude d'un solide ou d'un liquide à transférer de la chaleur) en $\text{W.K}^{-1}\text{m}^{-1}$.

Lorsque le four fonctionne, il y'a transfert de chaleur par conduction au niveau de la marmite, sur les parois du four et au sein du lit de combustible.

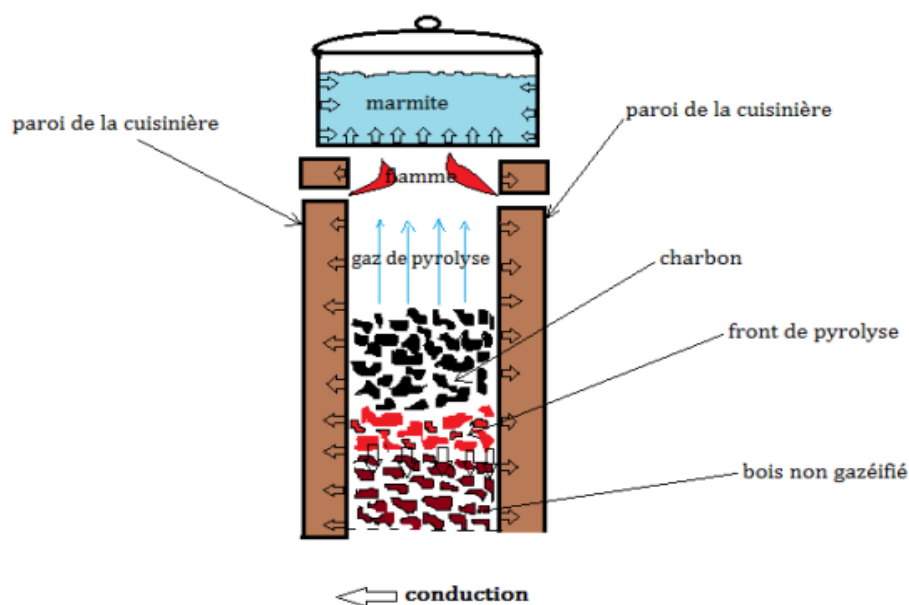


Figure II.4: Transfert de chaleur par conduction dans le four [30]

La forme algébrique du flux de chaleur par conduction sur un mur de surface S est :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.12})$$

Où φ représente le flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ représente la conductivité thermique du milieu (W/mK)

x représente la variable d'espace dans la direction du flux (m)

S représente l'aire de la section du passage du flux de chaleur (m^2).

La valeur de la température T est donnée par l'équation de chaleur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (\text{II.13})$$

b) La convection

La convection se réfère aux transferts thermiques qui ont lieu dans les fluides en mouvement macroscopique. Le transfert thermique est déterminé par le mouvement des particules élémentaires de fluide entre les zones ayant des températures différentes. Ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides qui échangent de l'énergie sous forme de chaleur et de quantité de mouvement entre elles.

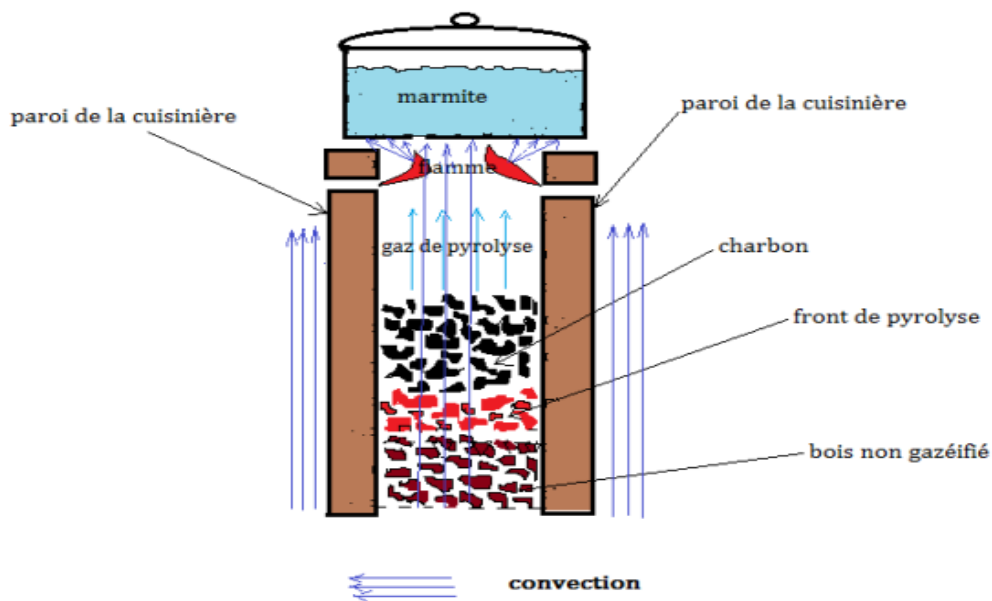


Figure II.5: Transfert de chaleur par convection dans la cuisinière [31]

La loi fondamentale régissant ce transfert de chaleur est **la loi de Newton**. Si la température du fluide est T_f et celle de la paroi en contact avec le fluide T_s , le flux de chaleur échangé par convection est donné par :

$$\varphi = h S (T_s - T_f) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

φ représente le flux de chaleur convectif en (W)

h représente le coefficient d'échange convectif en ($\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$)

S représente l'aire de la surface de contact solide/fluide en (m^2)

T_s représente la température de la surface du solide en (K)

T_f représente la température du fluide loin de la surface du solide en (K)

c) Le rayonnement

Le rayonnement est le mode de transfert qui se fait par émission ou absorption des ondes électromagnétiques. Ces radiations se propagent sans liaison matérielle entre le corps émissif et le corps récepteur. Le rayonnement d'un corps de surface S et de température T est donné par la loi fondamentale de **Stephan-Boltzmann** :

$$\varphi = \varepsilon \sigma S T^4 \quad (\text{II.15})$$

Quand un corps d'émissivité ε et de surface S à la température absolue T_s est dans une enceinte dont la température est T_{en} , le flux de chaleur échangé par rayonnement entre la surface et l'enceinte s'écrit :

$$\varphi = \varepsilon \sigma S (T_s^4 - T_{en}^4) \quad (\text{II.16})$$

Où φ représente le flux de chaleur transmis par rayonnement en (W)

σ La constante de Stefan ($5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

ε L'émissivité de la surface S

S L'aire de la surface en (m^2)

T_s Température de la surface en (K)

T_{en} Température du milieu environnant la surface en (K)

La figure suivante présente le rayonnement de diverses parties du système thermique.

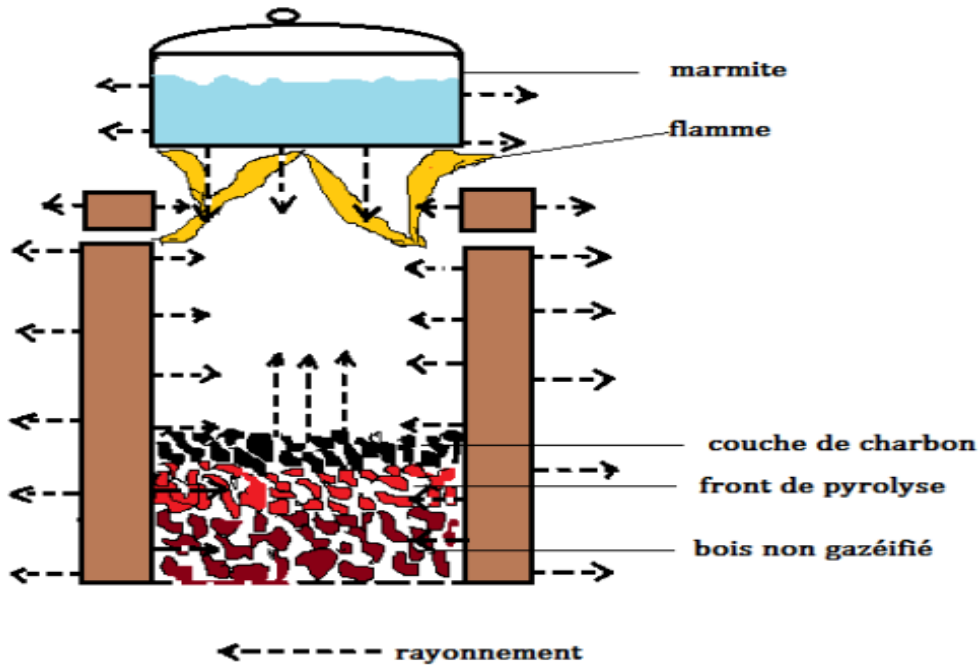


Figure II.6: Transfert de chaleur par rayonnement dans la cuisinière [31]

Pour le calcul du rendement de notre système, nous considérons l'échange de chaleur entre la couche de charbon de température T_c et une surface S de température T_s située à une distance h de cette couche. Son expression est :

$$Q_{ray} = \varepsilon \sigma S F_{cs} (T_c^4 - T_s^4) \quad (II.17)$$

Où F_{cs} est le facteur de forme géométrique de rayonnement de la surface de combustible vers la surface S rayonnée avec une valeur comprise entre 0 et 1. Le facteur de forme est calculé différemment selon la surface rayonnante et rayonnée considérée.

Avec le rendement du transfert de chaleur par radiation qui est donné par :

$$Q_{rad} = \frac{Q_{ray}}{PCI_{bois\ utilisé}} \quad (II.18)$$

Sachant que le dénominateur est calculé à partir de l'équation (II.17).

d) Flux de chaleur lié à un débit massique

Lorsqu'un débit massique $\dot{m}$ de matière entre dans le système à la température T_1 et en ressort à la température T_2 , le flux de chaleur entrant est :

$$\varphi_e = \dot{m}c(T_2 - T_1) \quad (\text{II.19})$$

Avec φ_e Flux de chaleur entrant en (W)

$\dot{m}$ Débit massique en (kg/s)

c Chaleur spécifique en (J/kg K)

T_1 Température d'entrée en (K)

T_2 Température de sortie en (K)

C'est grâce à l'évaluation de ces différents flux de chaleur que nous avons pu obtenir les équations de fonctionnement du four étudié.

II.3.2. Equations de fonctionnement

Les équations suivantes représentent les équations de fonctionnement du four à double paroi que nous étudions, obtenues par la méthode explicitée plus haut.

Bilan énergétique au niveau du combustible (nœud 1) :

$$1) \frac{dT_1}{dt} = \left(\frac{1}{m_c c_{p_c}} \right) [A_1 F_{12} \sigma (T_2^4 - T_1^4) + h_1 A_1 (T_3 - T_1) + A_1 F_{14} \sigma (T_4^4 - T_1^4) + U_{c1-10} A_1 (T_{10} - T_1) + Q_{\text{combustible}}] \quad (\text{II.20})$$

$$\text{Avec } U_{c1-10} = \frac{K_{\text{base}}}{e_{\text{base}}} \quad (\text{II.21})$$

Bilan énergétique au niveau du mur interne du four (nœud 2) :

$$2) \frac{dT_2}{dt} = \left(\frac{1}{m_{w1} c_{p_{w1}}} \right) [A_2 F_{21} \sigma (T_1^4 - T_2^4) + h_1 A_2 (T_3 - T_2) + A_2 F_{24} \sigma (T_4^4 - T_2^4) + U_{c2-8} A_3 (T_8 - T_2)] \quad (\text{II.22})$$

Bilan énergétique de l'air dans le four (nœud 3) :

$$3) \frac{dT_3}{dt} = \left(\frac{1}{m_{\text{air}1} c_{p_{\text{air}1}}} \right) [h_1 A_1 (T_1 - T_3) + h_1 A_2 (T_2 - T_3) + h_1 A_4 (T_4 - T_3)] \quad (\text{II.23})$$

Bilan énergétique au niveau de la base de la marmite (**nœud 4**) :

$$4) \frac{dT_4}{dt} = \left(\frac{1}{m_{\text{bpot}} C_{p_{\text{bpot}}}} \right) [A_4 F_{41} \sigma(T_1^4 - T_4^4) + h_1 A_4 (T_3 - T_4) + A_4 F_{42} \sigma(T_2^4 - T_4^4) + A_5 F_{45} \sigma(T_5^4 - T_4^4) + h_2 A_5 (T_6 - T_4) + A_5 F_{47} \sigma(T_7^4 - T_4^4) + A_4 F_{48} \sigma(T_8^4 - T_4^4)] \quad (\text{II.24})$$

Bilan énergétique au niveau des murs de la marmite (**nœud 5**) :

$$5) \frac{dT_5}{dt} = \left(\frac{1}{m_{\text{spot}} C_{p_{\text{spot}}}} \right) [A_6 F_{54} \sigma(T_4^4 - T_5^4) + h_2 A_6 (T_6 - T_5) + A_6 F_{57} \sigma(T_7^4 - T_5^4) + h_3 A_7 (T_9 - T_5) + A_7 F_{95} \sigma(T_9^4 - T_5^4)] \quad (\text{II.25})$$

Bilan énergétique dans la marmite (**nœud 6**) :

$$6) \frac{dT_6}{dt} = \left(\frac{1}{m_{\text{air2}} C_{p_{\text{air2}}}} \right) [h_2 A_5 (T_4 - T_6) + h_2 A_6 (T_5 - T_6) + h_2 A_8 (T_7 - T_6)] \quad (\text{II.26})$$

Bilan énergétique au niveau du couvercle de la marmite (**nœud 7**) :

$$7) \frac{dT_7}{dt} = \left(\frac{1}{m_{\text{cover}} C_{p_{\text{cover}}}} \right) [h_2 A_8 (T_6 - T_7) + A_8 F_{75} \sigma(T_5^4 - T_7^4) + A_8 F_{74} \sigma(T_4^4 - T_7^4) + h_3 A_9 (T_9 - T_7) + A_9 F_{97} \sigma(T_9^4 - T_7^4)] \quad (\text{II.27})$$

Bilan énergétique au niveau du mur externe du four (**nœud 8**) :

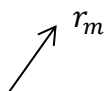
$$8) \frac{dT_8}{dt} = \left(\frac{1}{m_{w2} C_{p_{w2}}} \right) [h_3 A_{10} (T_9 - T_8) + U_{c2-8} A_3 (T_2 - T_8)] \quad (\text{II.28})$$

$$\text{Avec } U_{c2-8} = \frac{K_{\text{isolant}}}{e_{\text{isolant}}} \quad (\text{II.29})$$

A partir d'une simulation numérique permettant d'obtenir ces différentes températures, nous pourrions évaluer le rendement énergétique de ce four.

II.3.3. Calcul de quelques facteurs de forme

Soient les surfaces considérées suivantes :



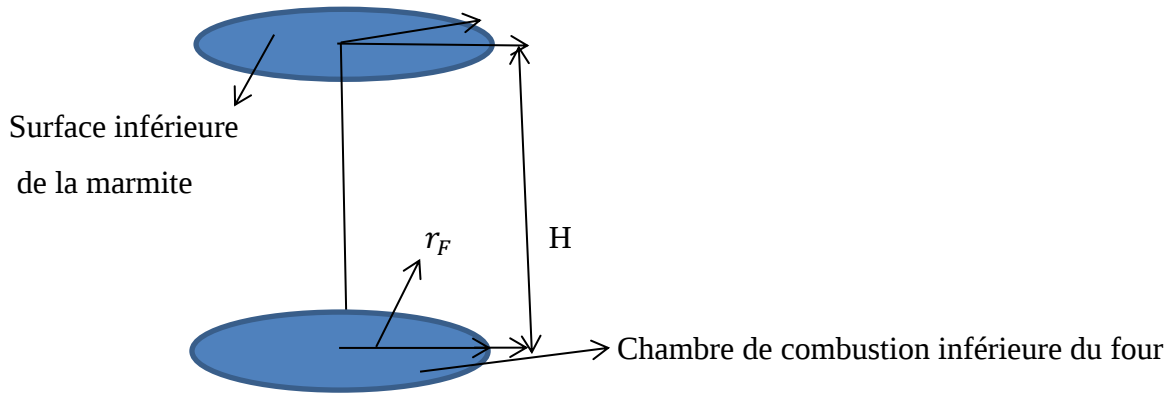


Figure II.7: Surfaces considérées pour le calcul des facteurs de forme

Lorsque la surface rayonnante est la surface inférieure de la chambre de combustion de rayon r_F avec pour surface rayonnée la surface inférieure de la marmite de rayon r_m , le facteur de forme sera calculé ainsi que suit :

$$F_{1-4} = \frac{1}{2} [Z - \sqrt{Z^2 - 4X^2Y^2}] \quad (\text{II.30})$$

$$\text{Avec} \begin{cases} X = \frac{r_m}{H} \\ Y = \frac{H}{r_F} \\ Z = 1 + (1 + X^2)Y^2 \\ H = \text{hauteur du four} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

II.3.4. Discrétisation des équations

Dans le but de simplifier nos équations obtenues précédemment, nous devons les discrétiser. Pour passer d'un problème exact continu régi par une équation différentielle partielle (EDP) au problème approché discret, il existe trois grandes familles de méthodes comme la méthode des différences finies, celle des volumes finis et celle d'éléments finis.

La méthode utilisée dans notre travail est celle des différences finies qui consiste à approximer les dérivées des équations de la physique au moyen des développements de Taylor et se déduit directement de la définition de la dérivée. Plus précisément la méthode des différences finies progressives pour la dérivée première :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T(j+1) - T(j)}{\Delta t} \quad (\text{II.32})$$

Les équations discrétisées de notre système thermique sont les suivantes :

1) Pour le nœud 1 :

$$(1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)T_1 = T_1^* + \alpha_1 T_2 + \alpha_2 T_3 + \alpha_3 T_4 + \alpha_4 T_{10} + \alpha_5 \quad (\text{II.33})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} \alpha_1 = \frac{\Delta t}{m_c c p_c} A_1 F_{12} \sigma T_{12}^3 \\ \alpha_2 = \frac{\Delta t}{m_c c p_c} h_1 A_1 \\ \alpha_3 = \frac{\Delta t}{m_c c p_c} A_1 F_{14} \sigma T_{41}^3 \\ \alpha_4 = \frac{\Delta t}{m_c c p_c} u_{c1-10} A_1 \\ \alpha_5 = \frac{\Delta t}{m_c c p_c} Q_{\text{combustible}} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

2) Pour le nœud 2 :

$$(1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4)T_2 = T_2^* + \beta_1 T_1 + \beta_2 T_3 + \beta_3 T_4 + \beta_4 T_8 \quad (\text{II.35})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} \beta_1 = \frac{\Delta t}{m_{w1} c p_{w1}} A_2 F_{21} \sigma T_{12}^3 \\ \beta_2 = \frac{\Delta t}{m_{w1} c p_{w1}} h_1 A_2 \\ \beta_3 = \frac{\Delta t}{m_{w1} c p_{w1}} A_2 F_{24} \sigma T_{42}^3 \\ \beta_4 = \frac{\Delta t}{m_{w1} c p_{w1}} u_{c2,8} A_3 \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

3) Pour le nœud 3 :

$$(1 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)T_3 = T_3^* + \gamma_1 T_1 + \gamma_2 T_2 + \gamma_3 T_4 \quad (\text{II.37})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} \gamma_1 = \frac{\Delta t}{m_{\text{air}1} c p_{\text{air}1}} h_1 A_1 \\ \gamma_2 = \frac{\Delta t}{m_{\text{air}1} c p_{\text{air}1}} h_1 A_2 \\ \gamma_3 = \frac{\Delta t}{m_{\text{air}1} c p_{\text{air}1}} h_1 A_4 \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

4) Pour le nœud 4 :

$$(1 + \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4 + \epsilon_5 + \epsilon_6 + \epsilon_7)T_4 = T_4^* + \epsilon_1 T_1 + \epsilon_2 T_3 + \epsilon_3 T_2 + \epsilon_4 T_5 + \epsilon_5 T_6 + \epsilon_6 T_7 + \epsilon_7 T_8 \quad (\text{II.39})$$

$$\text{Avec } \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \frac{\Delta t}{m_{\text{bpot}} c_{\text{p}} \text{bpot}} A_4 F_{41} \sigma T_{14}^3 \\ \varepsilon_2 = \frac{\Delta t}{m_{\text{bpot}} c_{\text{p}} \text{bpot}} h_1 A_4 \\ \varepsilon_3 = \frac{\Delta t}{m_{\text{bpot}} c_{\text{p}} \text{bpot}} A_4 F_{42} \sigma T_{24}^3 \\ \varepsilon_4 = \frac{\Delta t}{m_{\text{bpot}} c_{\text{p}} \text{bpot}} A_5 F_{45} \sigma T_{54}^3 \\ \varepsilon_5 = \frac{\Delta t}{m_{\text{bpot}} c_{\text{p}} \text{bpot}} h_2 A_5 \\ \varepsilon_6 = \frac{\Delta t}{m_{\text{bpot}} c_{\text{p}} \text{bpot}} A_5 F_{47} \sigma T_{74}^3 \\ \varepsilon_7 = \frac{\Delta t}{m_{\text{bpot}} c_{\text{p}} \text{bpot}} A_4 F_{4-8} \sigma T_{8-4}^3 \end{array} \right. \quad (\text{II.40})$$

5) Pour le nœud 5 :

$$(1 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) T_5 = T_5^* + \theta_1 T_4 + \theta_2 T_6 + \theta_3 T_7 + \theta_4 T_9 + \theta_5 T_9 \quad (\text{II.41})$$

$$\text{Avec } \left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = \frac{\Delta t}{m_{\text{spot}} c_{\text{p}} \text{spot}} A_6 F_{54} \sigma T_{45}^3 \\ \theta_2 = \frac{\Delta t}{m_{\text{spot}} c_{\text{p}} \text{spot}} h_2 A_6 \\ \theta_3 = \frac{\Delta t}{m_{\text{spot}} c_{\text{p}} \text{spot}} A_6 F_{57} \sigma T_{75}^3 \\ \theta_4 = \frac{\Delta t}{m_{\text{spot}} c_{\text{p}} \text{spot}} h_3 A_7 \\ \theta_5 = \frac{\Delta t}{m_{\text{spot}} c_{\text{p}} \text{spot}} A_7 F_{95} \sigma T_{95}^3 \end{array} \right. \quad (\text{II.42})$$

6) Pour le nœud 6 :

$$(1 + \omega_1 + \omega_2 + \omega_3) T_6 = T_6^* + \omega_1 T_4 + \omega_2 T_5 + \omega_3 T_7 \quad (\text{II.43})$$

$$\text{Avec } \left\{ \begin{array}{l} \omega_1 = \frac{\Delta t}{m_{\text{air2}} c_{\text{p}} \text{air2}} h_2 A_5 \\ \omega_2 = \frac{\Delta t}{m_{\text{air2}} c_{\text{p}} \text{air2}} h_2 A_6 \\ \omega_3 = \frac{\Delta t}{m_{\text{air2}} c_{\text{p}} \text{air2}} h_2 A_8 \end{array} \right. \quad (\text{II.44})$$

7) Pour le nœud 7 :

$$(1+\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5)T_7 = T_7^* + \rho_1 T_6 + \rho_2 T_5 + \rho_3 T_4 + \rho_4 T_9 + \rho_5 T_9 \quad (\text{II.45})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} \rho_1 = \frac{\Delta t}{m_{\text{cover}} c p_{\text{cover}}} h_2 A_8 \\ \rho_2 = \frac{\Delta t}{m_{\text{cover}} c p_{\text{cover}}} A_8 F_{75} \sigma T_{57}^3 \\ \rho_3 = \frac{\Delta t}{m_{\text{cover}} c p_{\text{cover}}} A_8 F_{74} \sigma T_{47}^3 \\ \rho_4 = \frac{\Delta t}{m_{\text{cover}} c p_{\text{cover}}} h_3 A_9 \\ \rho_5 = \frac{\Delta t}{m_{\text{cover}} c p_{\text{cover}}} A_9 F_{97} \sigma T_{97}^3 \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

8) Pour le nœud 8 :

$$(1+\varphi_1 + \varphi_2)T_8 = T_8^* + \varphi_1 T_9 + \varphi_2 T_2 \quad (\text{II.47})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} \varphi_1 = \frac{\Delta t}{m_{w2} c p_{w2}} h_3 A_{10} \\ \varphi_2 = \frac{\Delta t}{m_{w2} c p_{w2}} u_{c2,8} A_3 \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

Ces équations simplifiées ont permis à travers un programme résolu avec le solver ode 45 dans le logiciel Matlab d'obtenir les courbes des différentes températures pour chaque nœud.

II.3.5. Rendement énergétique du four

Définie comme étant l'état de fonctionnement d'un système pour lequel la consommation d'énergie est réduite pour un travail identique, l'efficacité énergétique se concentre sur l'optimisation de l'énergie qui passe par la réduction des gaspillages, des pertes et les consommations inutiles d'énergie. Dans le cas du four, l'efficacité énergétique thermique est le rapport de l'énergie utile réelle recueillie (Q_u) à la fois par la marmite et son air intérieur sur l'entrée de la chaleur de la source de chauffage ($Q_{\text{combustible}}$) selon cette formule :

$$\eta_{en} = \frac{Q_u}{Q_{\text{combustible}}} \quad (\text{II.49})$$

L'énergie utile réelle recueillie par la marmite et son air intérieur est donnée par :

$$Q_u = |m_{bpot}c_{p_{bpot}}(T_4 - T_0) + m_{spot}c_{p_{spot}}(T_5 - T_0) + m_{air2}c_{p_{air2}}(T_6 - T_0) + m_{cover}c_{p_{cover}}(T_7 - T_0)| / t \quad (II.50)$$

Et l'énergie thermique de la source de chauffage est calculée par :

$$Q_{combustible} = \eta \dot{m} p c \quad (II.51)$$

En effet, un four est d'autant plus efficace que la plus grande quantité de chaleur générée est transférée à la surface inférieure de la marmite.

Le tableau suivant nous présente les différents paramètres utilisés lors de la simulation sous le logiciel Matlab.

Tableau II. 4: Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs	Références
h_1	40 w/m ² K	[32]
h_2	40 w/m ² K	[32]
h_3	5,7+3,8v w/m ² K	[33]
V	0,1 m/s	[32]
K_{base}	200 w/m K	[34]
η	0,75	[35]
$\dot{m}$	2,0.10 ⁻⁴ kg/s	[36]
PC	133.10 ⁵ J/kg	[35]
T_0	305 K	[36]
T_9	305 K	[36]
ρ_c	740 kg/m ³	[5]
ρ_{air}	0,9 kg/m ³	[5]
ρ_{alu}	2700 kg/m ³	[5]
$C_{p_{air}}$	1004 J/kg K	[5]
$C_{p_{alu}}$	896 J/kg K	[33]
ε	0,8	[5]
C_{p_c}	1112 J/kg K	[6]
σ	5,6 10 ⁻⁸ w/m ² K ⁴	[33]

En ce qui concerne les valeurs des paramètres de simulation, nous avons travaillé avec certains paramètres dont les dimensions du four et de la marmite que nous n'avons pas obtenues de la littérature.

Conclusion

Dans cette partie, il était question de présenter le matériel et la méthode de modélisation utilisés pour effectuer ce travail. Pour la modélisation du four d'étude, nous avons subdivisé en plusieurs nœuds le système thermique et après avoir recensé les différents modes de transfert de chaleur entre ces nœuds par la méthode d'approche du réseau thermique, nous avons obtenu un système de huit équations. Par la suite, nous avons implémenté ce système dans le logiciel Matlab sous forme de programme et résolu avec le solveur ode 45 pour pouvoir obtenir les différentes courbes de température et de rendement énergétique voulues .

Chapitre III: Résultats et discussions

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents résultats obtenus après simulation des équations du système thermique étudié. Les équations obtenues lors de la modélisation dans le chapitre précédent, ont été implémentées dans un programme Matlab afin de produire les courbes de température des différents nœuds du système thermique constitué par le four et la marmite. Par la suite, nous présenterons la courbe du rendement énergétique du système thermique obtenue tout en faisant varier certains paramètres afin de voir leur influence sur le rendement du four. Enfin, nous présenterons les discussions ainsi qu'une conclusion sur tous ces résultats obtenus.

III .1. Présentation des courbes de température des nœuds du système thermique

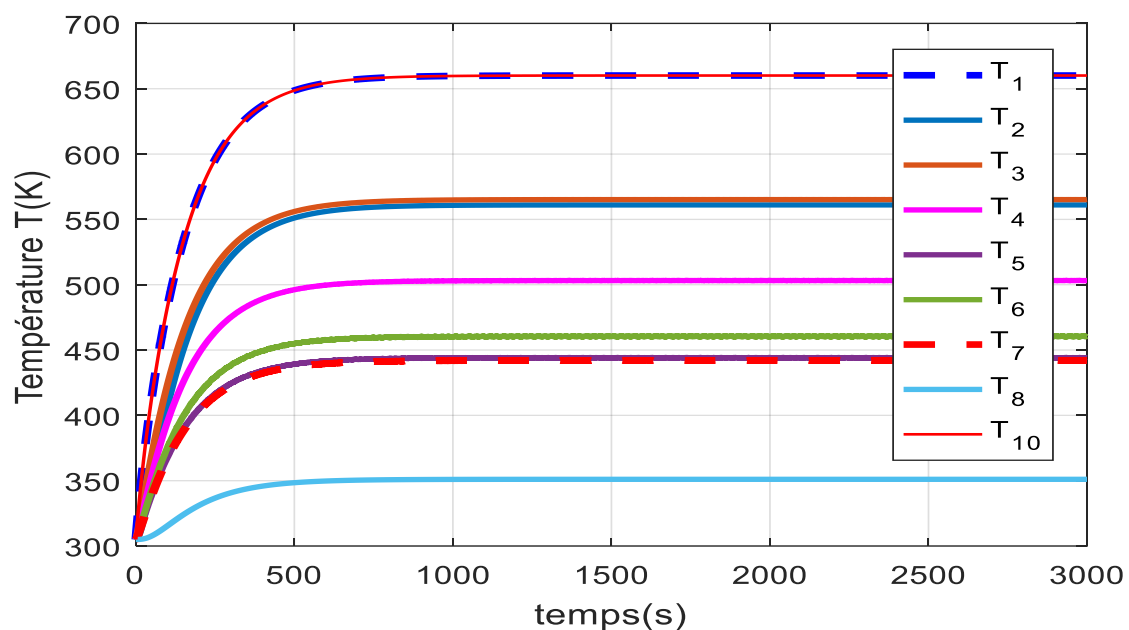
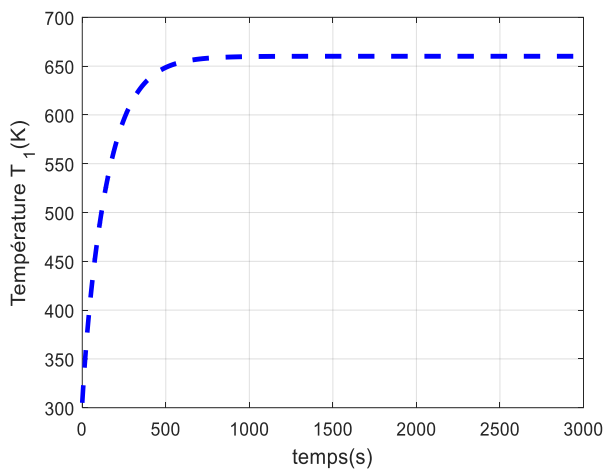
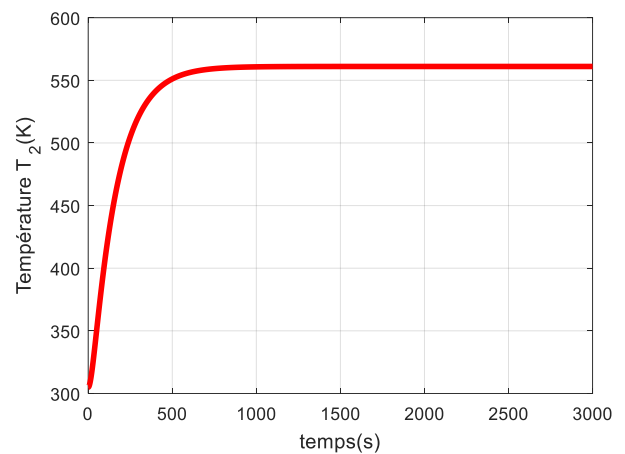


Figure III.1: Courbes de température des différents nœuds du système thermique

Cette figure présente les courbes de température de chaque nœud du système thermique (Four et marmite) en fonction du temps. Pour une meilleure visibilité et interprétation de ces courbes, nous les présentons par paire.



(a) Température de la source de chaleur



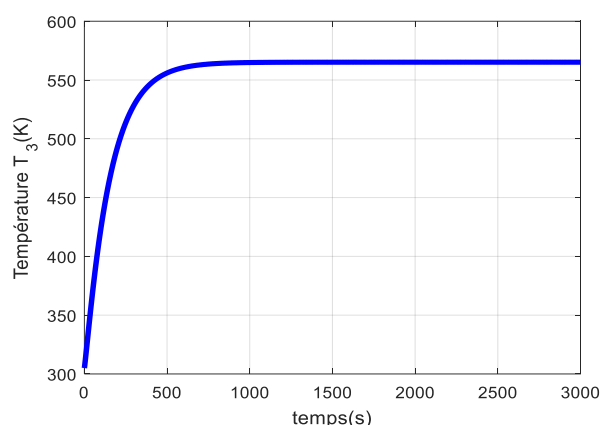
(b) Température du mur interne du four

Figure III.2: Variation de la température aux nœuds 1 et 2 en fonction du temps

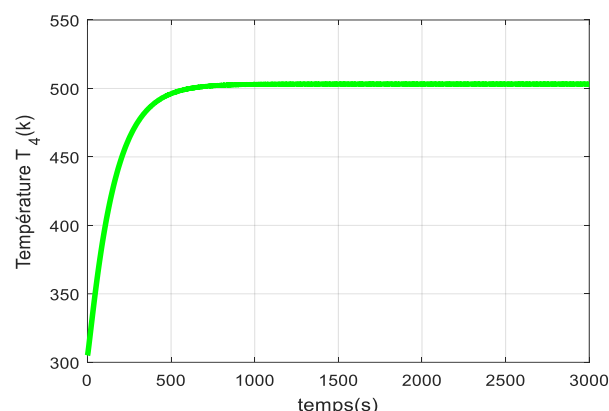
La figure précédente présente les courbes de température des nœuds 1 et 2 du système thermique (Four et marmite).

Pour la figure **III.2.a** montrant le profil de la température de la source de chaleur en fonction du temps, il peut être observé que la température croît de **305 à 660.1K** dans l'intervalle de temps allant de **0 à 1241** secondes, pour demeurer constante à partir **660.1 K**. La croissance de la courbe s'explique par le fait que la source de chaleur est en pleine combustion et se consume jusqu'à atteindre l'équilibre thermique après lequel elle reste constante.

La deuxième figure **III.2.b** représente la variation de la température du mur interne du four. Cette courbe a la même allure que celle de la courbe de température **T₂** obtenue par Sagouong et Tchuen [5] dans la modélisation mathématique de trois fours où la courbe croît également jusqu'à un certain pic avant de demeurer constante. Nous remarquons que cette température croît moins vite celle de la source de chaleur à la figure **III.2.a** à partir de **305 K** pour atteindre un pic d'environ **561K** au temps de **1179** secondes et demeurer constante par la suite. Ceci peut s'expliquer par le fait que la température à ce niveau est influencée par le transfert par convection entre l'air ambiant dans le four et le mur du four.



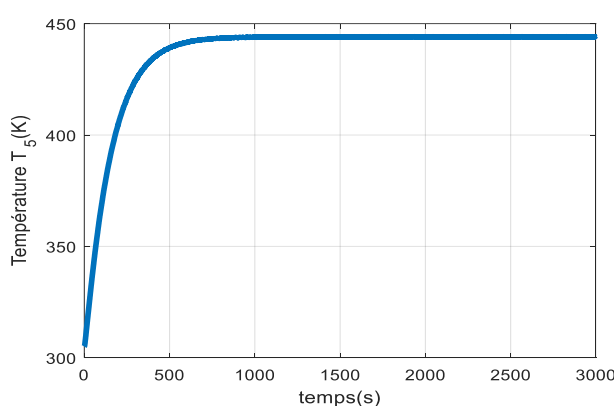
(a) Température de l'air dans le four



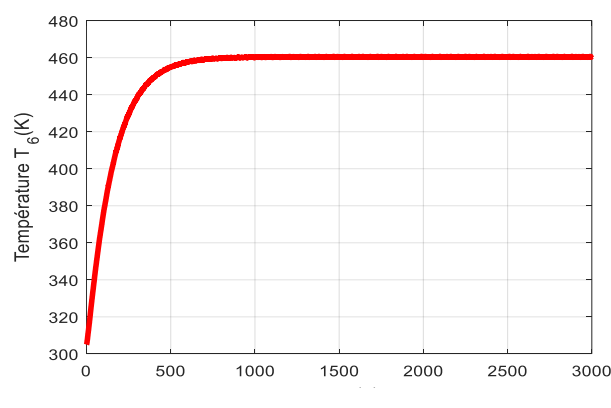
(b) Température à la base de la marmite

Figure III.3: Variation des températures aux nœuds 3 et 4 en fonction du temps

La figure **III.3.a** représente la température de l'air interne au four (T_3) et la figure **III.3.b** représente celle à la base de la marmite. On remarque que ces courbes ont à peu près la même allure et que la température de l'air ambiant dans le four est supérieure à celle de la base de la marmite. Elles commencent à croître à partir de **305 K** et atteignent **565.1 K** dans l'intervalle de temps **(0-1174 secondes)** pour le nœud 3 **et 503.1 K** dans l'intervalle de temps **(0-1180 secondes)** pour le nœud 4 pour enfin demeurer constante. Cette supériorité de T_3 par rapport à T_4 est due au fait que lorsque la chaleur de l'air ambiant dans le four était transmise à la base de la marmite, ce n'est qu'une partie qui a été transmise à cause du phénomène de convection qui a lieu entre ces deux nœuds.



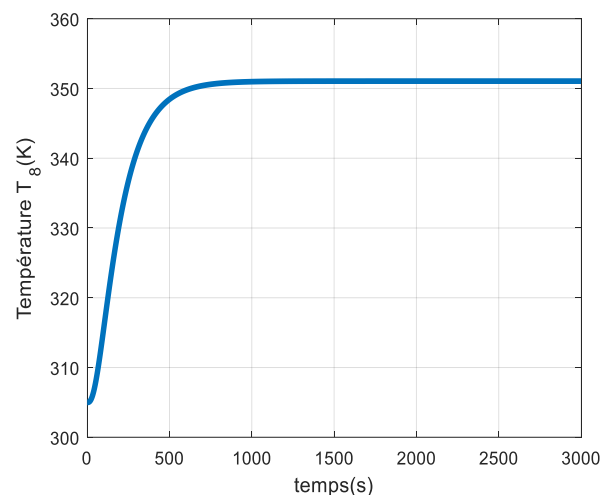
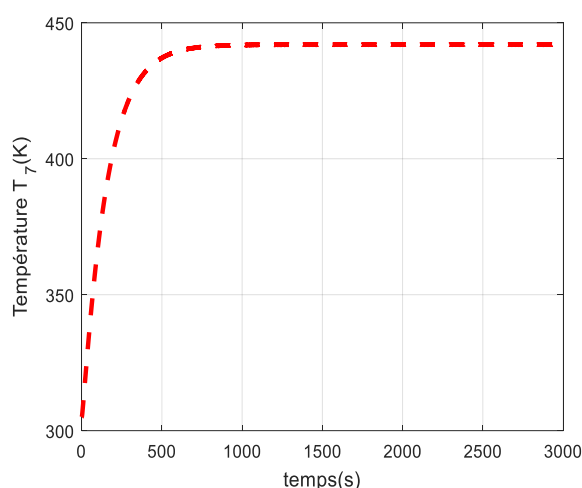
(a) Température des murs de la marmite



(b) Température à l'intérieur de la marmite

Figure III.4: Variation de la température pour les nœuds 5 et 6 en fonction du temps

Pour la courbe de température du mur de la marmite (T_5), on remarque que la température croît de **305 K** jusqu'à une valeur d'environ **443.9 K** pour l'intervalle de temps (**0-1013**) secondes, ensuite elle reste constante. Ceci s'explique par le fait que le courant de convection de l'air externe à la marmite réduit la température à ce nœud. Pour la courbe de température au nœud **6** qui est la température à l'intérieur de la marmite (T_6), elle commence à croître à partir de **305K** jusqu'à atteindre **460 K** pendant l'intervalle de temps entre **0 et 1008** secondes, puis reste constante. Nous constatons que la courbe (T_6) croît plus vite que (T_5) et s'explique par le fait que la température à la base de la marmite est directement transférée à l'intérieur de la marmite par convection de même que la température du mur de la marmite T_5 .



(a) Température du couvercle de la marmite

(b) Température du mur externe du four

Figure III.5: Variation de la température des nœuds 7 et 8 en fonction du temps

Nous remarquons que ces deux courbes varient presque de la même manière. La courbe de la température au nœud 7 présente l'évolution de la température du couvercle de la marmite. On remarque qu'elle commence à croître de **305 K** jusqu'à un pic de **441.9 K** à un temps de **1051** secondes par la suite, elle demeure constante. Cette température est basse comme celle du mur de la marmite à cause du fait qu'elles sont directement soumises à l'air ambiant. La température du nœud **8** représente celle du mur externe du four, cette température varie de **305 K** à **351 K** jusqu'à un temps de près de **1006** secondes pour enfin demeurer constante. Cette faible valeur de la température se comprend par le fait que la couche isolante agit de façon à empêcher la perte de l'énergie thermique du four.

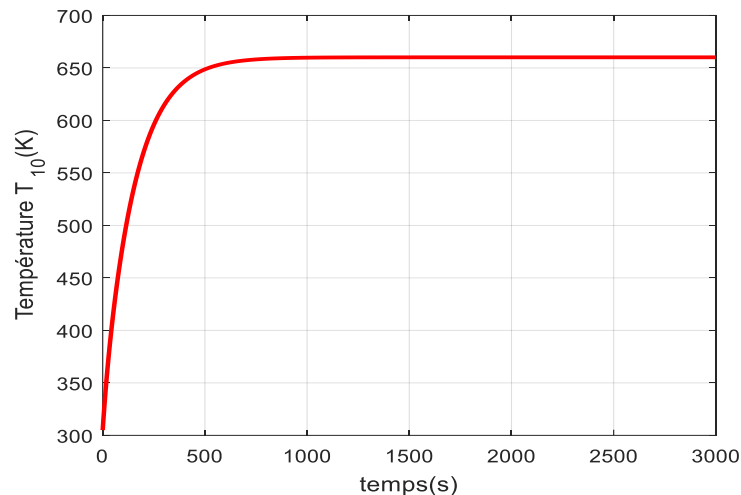


Figure III.6: Courbe de température pour le nœud 10 du système thermique

Cette courbe présente la température à la base du four. Elle croît de **305 à 660 K** dans l'intervalle de temps allant de **0 à 1266** secondes et elle demeure constante par la suite sur cette valeur de **660 K**. Nous remarquons que cette courbe croît aussi vite que la température de la source de chaleur qui est la plus élevée.

III.2. Discussion des différentes courbes

Au regard des résultats obtenus, nous remarquons que les températures les plus grandes sont T_1 et T_{10} représentant la température de la source de chaleur dans le four et celle à la base du four. Ceci est dû au fait que la base du four est le support de la source de chaleur et le transfert par conduction qui se fait entre ces deux nœuds. Par la suite, vont suivre les températures T_3 qui est celle de l'air dans le four puis T_2 qui est la température de la paroi interne du four et enfin les moins basses T_4 la température à la base de la marmite, T_5 la température des murs de la marmite T_6 étant la température à l'intérieur de la marmite, T_7 la température du couvercle de la marmite et T_8 qui représente la température du mur externe au four. La température à la base de la marmite T_4 est plus chaude que les autres parties de la marmite à cause du fait qu'elle échange directement par convection avec la source de chaleur. La température T_7 qui est celle du couvercle de la marmite est la plus basse parmi celles des différents nœuds de la marmite. Cette faible valeur est due aux différents transferts de chaleur et les différentes pertes qu'a subi la température de la source de chaleur lors de son déplacement pour pouvoir arriver à ce nœud tandis que T_8 est la température la plus basse du four à cause du fait que l'isolant entre ces deux parois du four empêche la perte de la chaleur de la paroi interne vers la paroi externe. L'évolution de ces températures obtenues respecte la réalité du comportement d'un système

physique où le transfert de chaleur se déplace toujours du milieu de plus grande température vers le milieu de basse température. Ces résultats sont également en accord avec les résultats des travaux de Sagouong et Tchuen [5], effectués sur la modélisation mathématique de trois fours traditionnels de configurations différentes comme nous pouvons le voir sur la figure ci-dessous. En nous référant donc à cela, nous pouvons apprécier la modélisation mathématique de ce four par la méthode d'approche du réseau thermique.

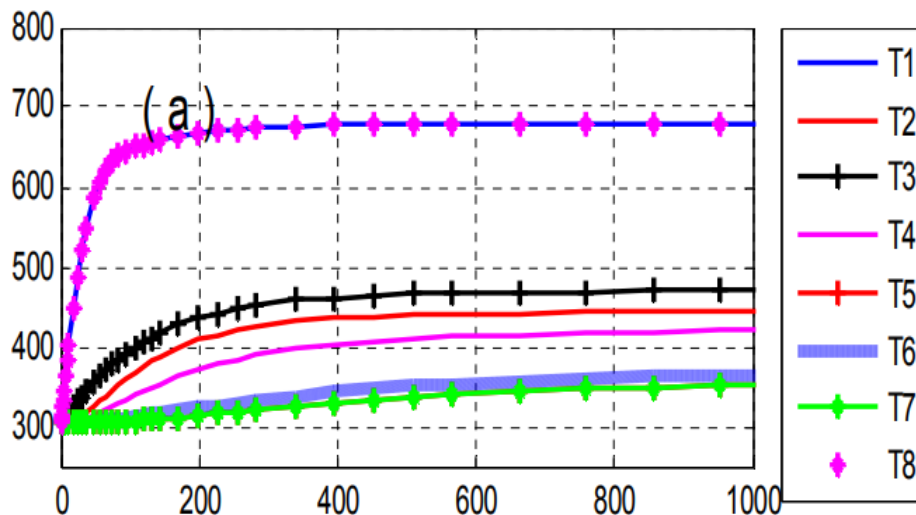


Figure III.7: Profil de température des différents nœuds du système thermique pour la configuration 3

III.3. Courbes du rendement énergétique

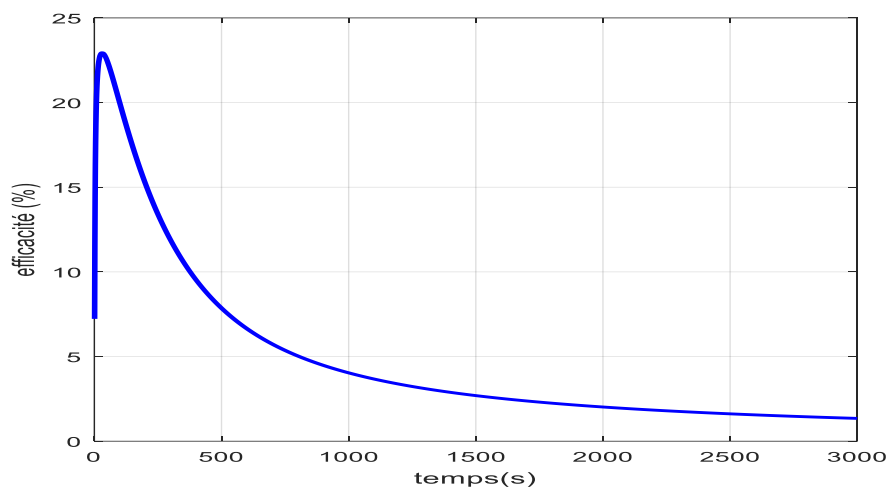


Figure III.8: Courbe du rendement énergétique du four d'étude

La courbe du rendement énergétique obtenue nous donne une valeur de 22.7 % qui est supérieure au rendement énergétique du four traditionnel oscillant entre 9 et 15% selon la référence [5]. Nous remarquons que cette courbe croît jusqu'à 200 secondes où elle atteint un pic qui donne la valeur du rendement du four avant de décroître jusqu'à une certaine valeur et demeurer constante par la suite.

Pendant l'intervalle de temps allant de 0 à 200 secondes, la courbe du rendement énergétique croît rapidement due à la combustion de la source de chaleur qui va augmenter la température de chaque nœud du système thermique. A partir de 200 secondes, on observe une décroissance de la courbe qui s'explique par les différents transferts de chaleur à savoir la conduction, la convection et le rayonnement qui ont lieu quand le four fonctionne favorisant ainsi les pertes thermiques. Ces pertes vont contribuer à la décroissance de la courbe d'efficacité énergétique jusqu'à une certaine valeur où elle demeurera constante. La constance de la courbe du rendement énergétique s'explique par le fait que le système thermique a atteint l'équilibre thermique. L'allure de la courbe du rendement énergétique que nous avons obtenue est similaire à celle de la courbe du rendement énergétique obtenue par Sagouong et Tchuen [5] où les rendements obtenus pour chaque configuration furent 10,34% et 10,03%. Notons aussi que cette valeur est différente de celle de la littérature avec une différence de 1,3 % à cause des valeurs différentes des paramètres utilisés lors de la simulation.

III.4. Influence du type d'isolant sur le rendement énergétique

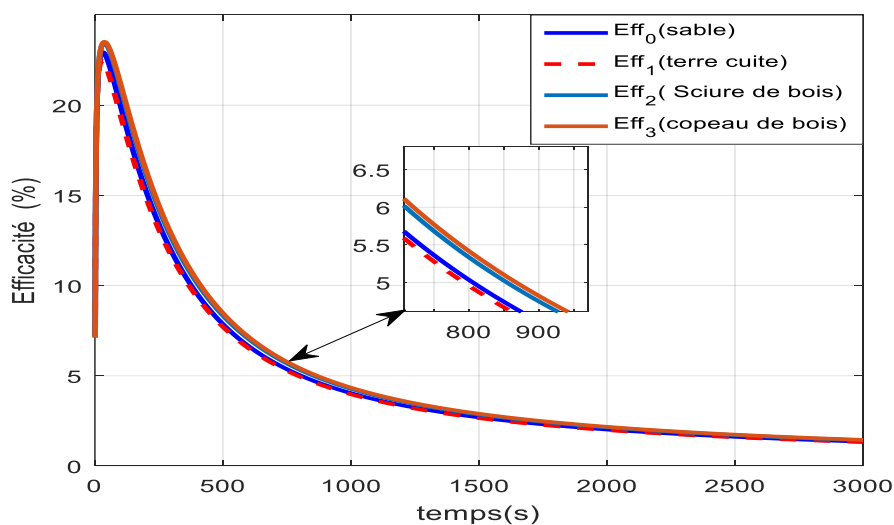


Figure III.9: Courbes du rendement énergétique pour plusieurs isolants

Par ailleurs, afin de connaître l'impact du type d'isolant dans le four à double parois, nous avons fait une analyse qui consistait à calculer le rendement énergétique du four en remplaçant la couche isolante par des isolants différents tout en maintenant la valeur de son épaisseur constante. Les résultats suivants présentent les valeurs du rendement énergétique pour chaque isolant.

Pour la sciure de bois de conductivité thermique 0,065 W/mK, nous avons obtenu un rendement énergétique de 23.4 %. Pour le sable de conductivité thermique 0,4 W/mK, nous avons obtenu une valeur de 22,7 %. En prenant la terre cuite comme isolant de conductivité thermique 1,35 W/mK, nous avons obtenu un rendement énergétique d'environ 22,1 % et enfin lorsque l'isolant est le copeau de bois de conductivité thermique 0,04 W/mK, le rendement est de 23,5 %. Nous constatons que c'est le four dont l'isolant est le copeau de bois qui aura un rendement énergétique plus élevé par rapport aux autres ensuite va suivre celui dont l'isolant est la sciure de bois, puis le four avec pour isolant le sable pour enfin finir par celui dont l'isolant est la terre cuite. En effet, plus l'isolant a une grande conductivité thermique plus le gradient de température augmente favorisant ainsi un transfert de chaleur vers l'extérieur au lieu de la conserver. Donc, il serait préférable d'utiliser des fours dont 'isolant a une moindre valeur de conductivité thermique pour favoriser un rendement énergétique plus élevé et donc la réduction de la consommation du combustible lors de la cuisson.

III.5. Influence de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement énergétique

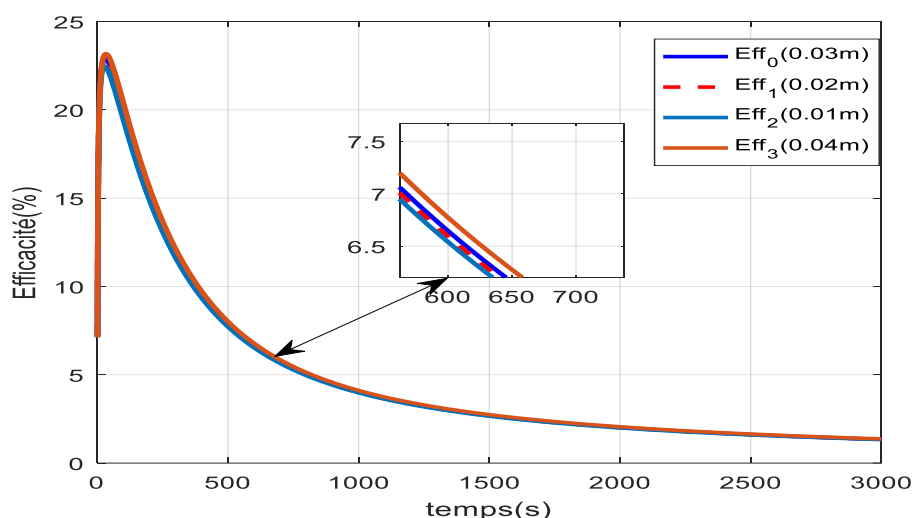


Figure III.10: Courbes du rendement énergétique pour différentes épaisseurs

Cette figure présente des courbes du rendement énergétique du four pour différentes épaisseurs de l'isolant du four étudié qui est le sable. Nous avons obtenu un rendement de 23 % avec une épaisseur de 0.04 m, puis 22.7 % pour l'épaisseur du four étudié 0.03 m ensuite 22.5 % pour une valeur de 0.02 m et enfin 22.4 % pour une épaisseur de 0.01 m. Nous notons que pour des fours ayant un même isolant, celui qui aura le plus grand rendement est celui dont l'épaisseur est la plus grande. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'épaisseur de l'isolant contribue à conserver la chaleur dans le four en favorisant une faible conductivité de la chaleur vers l'extérieur du four.

Conclusion

Dans cette troisième partie, il était question de présenter les différents résultats obtenus et leurs discussions. Nous avons obtenu plusieurs courbes après simulation numérique à savoir les courbes de température et celles du rendement énergétique pour différents isolants et pour différentes épaisseurs de l'isolant. Il en ressort que, lorsque l'isolant dans le four a une faible conductivité thermique, celui-ci joue le rôle de convection naturelle et augmente ainsi la valeur du rendement énergétique. Ainsi donc, nous suggérons d'utiliser les fours double parois dont la couche isolante a une très faible conductivité thermique pour minimiser les pertes thermiques et ainsi favoriser l'économie de combustibles. De plus, nous avons constaté que plus l'épaisseur de l'isolant est grande, le rendement énergétique est également grand.

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail, il était question d'effectuer la modélisation mathématique et la simulation numérique des fours améliorés au Cameroun. Pour se faire, nous avons utilisé la méthode d'approche du réseau thermique lors de la modélisation mathématique par laquelle, nous avons obtenu un système de huit équations régissant le fonctionnement du four d'étude. Ensuite, nous avons simulé ces équations avec le logiciel Matlab ce qui nous a permis d'obtenir la température de chaque nœud constituant le système thermique (Four et Marmite) et la valeur du rendement énergétique du four. Les courbes de température obtenues respectent les réalités de la physique thermique qui veut que la chaleur doive se déplacer du milieu chaud vers le milieu froid. Le rendement énergétique obtenu a pour valeur 22,7 % ce qui est meilleur par rapport aux foyers traditionnels. Dans le but d'optimiser le rendement énergétique du four d'étude, nous avons effectué des tests avec les isolants de même épaisseur et nous nous sommes rendu compte que parmi les isolants utilisés à savoir le sable, la terre cuite, la sciure de bois et le copeau de bois, c'est le four dont l'isolant est le copeau de bois qui a un meilleur rendement énergétique de valeur 23,5 %. Le constat fait est que lorsque l'isolant a une grande valeur de conductivité thermique, il facilite le transfert de chaleur du four vers l'extérieur et donc il serait judicieux d'utiliser des fours dont l'isolant possède une très faible valeur de conductivité thermique. Dans la même logique, nous avons fait une étude de l'influence de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement énergétique du four dans laquelle nous avons retenu que lorsque l'épaisseur de l'isolant est grande cela contribue à augmenter le rendement énergétique du four et pour le four étudié, nous avons obtenu un rendement plus grand d'une valeur de 23 % sur un rendement de 22.7 % au préalable. Ainsi, il serait préférable de privilégier l'utilisation des fours qui non seulement ont un bon isolant c'est-à-dire de très faible conductivité thermique, mais également possède une grande épaisseur car ces fours ont un rendement énergétique plus optimal.

Comme perspectives, nous prévoyons dans un futur très proche de :

- Faire l'analyse exergétique du four étudié ;
- A partir des résultats obtenus de cette analyse, optimiser le rendement de ce four ;
- Mettre sur pied un tel four

Références bibliographiques

- [1] J. O.Adria, «What users can save with energy-efficient cooking stoves and ovens,» p. 9/30, 2014.
- [2] C.Tatsinkou, «SEMINAR ON Mainstreaming Energy Sustainable Development Goals,Targets and indicators into statistical programmes,» 27 ,29 june 2016.
- [3] S. Nakai, E.Taylor, «The levels of toxic air pollutants in Kitchens with traditional stoves in Sierra Leone,» 2012.
- [4] P. A. O. Kitoko, «Facteurs d'adoption des foyers améliorés en milieux urbains sahéliens camerounais.,» 13/20, 2018.
- [5] J. M. Sagouong ,G. Tchien, «Mathematical Modelling of traditional stoves using the thermal Network approach,» vol. 58, p. 1/9, 2018.
- [6] Saidur et al, «A review on biomass as a fuel for boilers,» *Renewable and Sustainable Energy reviews*, 2011.
- [7] S. K.Tyagi et al, «Experimental study and performance evaluation of various cookstove models based on energy and exergy analysis,» *Académiai Kiado*, p. 9, 2012.
- [8] N.L.Panwar, «Energetic and exergetic performance evaluation of improved biomass cookstoves,» *International Journal of Exergy*, 2014.
- [9] <https://fr.m.wikipedia.org>, « Energie au Cameroun,» mai 2023. [En ligne].
- [10] Carte du Cameroun ,«<https://www.cityzeum.com>,» [En ligne].
- [11] G.Tchatat, «Rapport Final Cameroun,» Douala, 2014.
- [12] G. B. westhoff, «Foyers en images.,» 1995.
- [13] L.Dorval, «<https://www.travelblog.org>,» [En ligne].
- [14] A.M.Nzouankeu, «la lutte contre la déforestation passe par la cuisine,» 2014. [En ligne].
- [15] F. Douglas et al, «what makes people cook with improved biomass stoves,» 1994.
- [16] PROTEGE QV:Promotion des technologies garantes de l'environnement et de la qualité «[https:// www.Protegeqv.org](https://www.Protegeqv.org),» 2020. [En ligne].
- [17] D.J.Zube, Heat Transfer Efficiency of Biomass Cookstoves, colorado, 2010.

- [18] A.Verschaere, les 3 modes de transfert thermique, 2016.
- [19] Dr Ir Akouehou et al, «Fiche technique :Foyers améliorés recommandés pour des usages domestiques de bois au Bénin,» 2012.
- [20] P. Triboult, M.C. Trouy, «Matériau bois-structure et caractéristiques,» p. 13, 2019.
- [21] Bois de chauffage,«<https://www.ressourcebois.com>,» [En ligne].
- [22] F.Salbitano, Contribution du bois-énergie à la satisfaction des besoins énergétiques des populations d'Afrique centrale.
- [23] F.Mermoud, «Gazéification du charbon de bois à la vapeur d'eau ; de la particule isolée,» Toulouse, 2012.
- [24] F. Vallon, «les différents types de bois,» 2020.
- [25] M.Billiout, «Peut-on utiliser du charbon de bois pour un Brasero?,» Février 2022.
- [26] S.F.Baldwin, Biomass stoves,Engineering design and construction., 1952.
- [27] <https://www.woodyflam.com>, «quel est le pouvoir calorifique du bois,» 2017.
- [28] <https://Praticalaction.org>, «Production du charbon de bois».
- [29] B. Mulu et al, «Theoretical and experimental comparison of box solar cookers with and without internal reflector,» 2014.
- [30] T.B.Reed et al, «Testing and modeling the wood gas “Turbo Stove”.,» 2002.
- [31] S.F.Baldwin, Biomass stoves: Engineering design, development, and dissemination., 1987.
- [32] K.James, «Measurements of heat transfer coefficients within convection ovens,» Journal of food engineering, 2006.
- [33] G.Tchuen,Y.W.Koholé, «comparative study of three thermosyphon solar water heaters made of flat- plate collectors with different absorber configurations.,» International Journal of Sustainable Energy, 2017.
- [34] MATIC, «<http://google.com> :Table des masses volumiques de diverses substances,» 12 Février 2022. [En ligne].
- [35] E.Frédéric, «<http://fred.elie.free.fr>:Tirage d'une cheminée,» 2013. [En ligne].
- [36] A.A.Samuel., «Design.Construction and Testing of an Improved wood Stove,» 2009.