

Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR des Sciences et Technologies

Département de Physique

Mémoire de master Physique et Applications

Spécialité : **Physique des Matériaux**

Modélisation numérique du fonctionnement d'un four solaire : Conception et validation

Présenté par : **Laurent BASSENE**

Sous la direction de : **Dr Joseph Sambasene DIATTA**

Soutenu publiquement le 20/12/2019 devant le jury composé de :

Prénoms et Nom	Grade	Qualité	Etablissement
Edouard DIOUF	Maître de conférences	Président du Jury	UASZ/ST
Sérigne THIAO	Assistant	Rapporteur	UASZ/ST
Mamadou Lamine MBAYE	Maître Assistant	Examineur	UASZ/ST
Moussa TOURE	Docteur	Examineur	UASZ/ST
Joseph Sambasene DIATTA	Maître Assistant	Encadrant	UASZ/ST

Remerciements

Avant tout, je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la force et le courage de réaliser ce travail de recherche en master.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont soutenu durant la réalisation de ce mémoire de master.

Mes sincères remerciements à **Monsieur Joseph Sambasene DIATTA** et **Monsieur Moussa TOURE** qui ont acceptés de diriger et de donner l'orientation de ce travail. La pertinence de leurs conseils, la méthodologie de leurs travaux et leurs rigueurs scientifiques ont accompagné l'aboutissement de ce travail.

J'exprime toute ma gratitude envers Messieurs **Edouard DIOUF**, **Sérigne THIAO** et **Mamadou Lamine MBAYE** qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les membres du jury de ce travail. Vos remarques et suggestions me sont d'un grand intérêt.

Je remercie également tous les enseignants de l'Unité de Formation et de la Recherche (UFR) des Sciences et Technologies de l'Université Assane Seck de Ziguinchor, en particulier ceux des départements de Physique, de Chimie, de Mathématiques et d'Informatique.

Je tiens à remercier aussi tous les docteurs, doctorants et doctorantes du département de Physique qui m'ont apporté leurs soutiens et leurs conseils.

Merci à **Monsieur Abdoul Aziz DIALLO** et **Monsieur Birame Math DABO** qui m'ont aidé à transporter le four solaire avant et après les expériences.

Je remercie également le personnel du laboratoire de Physique des matériaux en particulier **M. Dioncounda Yock** et **M. Ousmane BODIAN**.

Résumé

L'objectif de ce travail est de concevoir un modèle numérique fiable et capable de simuler la distribution temporelle et spatiale des paramètres physiques tels que la température, la vitesse moyenne du fluide et la pression absolue dans un four solaire en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics version 5.3 développé par la méthode des éléments finis.

Pour cela, une première partie numérique détaille le modèle fluide-thermique développé dans ce travail. Celui-ci est un couplage de deux physiques : l'équation de la chaleur dans les fluides et dans les solides et l'équation de Navier-Stokes qui modélise l'écoulement laminaire de l'air présent dans le four.

Pour valider cette partie numérique, une expérience a été réalisée sur un four solaire de type boîte. Des thermocouples ont été placés à différents endroits du four solaire de type boîte afin d'y mesurer les températures durant le temps d'ensoleillement.

Les résultats expérimentaux, comparés aux résultats numériques, sont en parfaite adéquation avec les résultats issus du modèle numérique quantifier.

Mots clés : Comsol Multiphysics, Four solaire, méthode des éléments finis, thermocouple

Abstract

The objective of this work is to build a reliable numerical model which is able to simulate the temporal and spatial distribution of physical parameters such as temperature, mean fluid velocity and pressure in a solar box cooker using the COMSOL Multiphysics software developed by the finite element method.

For this purpose, a first numerical part details the fluid-thermal model developed in this work. This is a coupling of two physics: the heat equation in fluids and solids and the Navier-Stokes equation that models the laminar flow of air in the solar box cooker.

To validate this numerical part, an experiment was carried out on a solar box cooker. Indeed, thermocouples were placed at different locations in the solar box cooker to measure temperatures during the sunshine weather.

The experimental results, compared to the numerical results, are similar to the results from the numerical model.

Keywords: Comsol Multiphysics, finite element method, solar cooker, thermocouple.

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
RESUME	II
ABSTRACT	III
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES ABREVIATIONS	VIII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1: GENERALITES DU FOUR SOLAIRE	2
1.1 INTRODUCTION	2
1.2 DIFFERENTS FOURS SOLAIRES.....	2
1.2.1 FOURS SOLAIRES PARABOLIQUES	2
1.2.2 FOUR SOLAIRE D’ODEILLO	3
1.2.3 FOURS SOLAIRES DE TYPE BOITE.....	4
1.3 LE FONCTIONNEMENT DU FOUR SOLAIRE	4
1.3.1 LES REFLECTEURS	5
1.3.2 LE PAPIER ALUMINIUM	5
1.3.3 LA PLAQUE ABSORBANTE.....	5
1.3.4 LE DOUBLE VITRAGE	5
1.4 PROCESSUS DE FABRICATION DU FOUR SOLAIRE DE TYPE BOITE.....	6
1.5 LE PRIX DU FOUR SOLAIRE.....	8
1.6 IMPACT DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LE FONCTIONNEMENT DU FOUR SOLAIRE.	9
1.7 ASPECTS SOCIO- ECONOMIQUE	9
1.8 CONCLUSION.....	9
CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES	10
2.1 INTRODUCTION	10
2.2 EXPERIENCE	10
2.3 MODELISATION NUMERIQUE.....	13
2.3.1 EQUATIONS PHYSIQUES	13

2.3.2	CONDITIONS AUX LIMITES	14
2.3.3	CONDITIONS INITIALES	15
2.4	PRESENTATION DE COMSOL MULTIPHYSICS	15
2.5	DESCRIPTION DU MODELE.....	16
2.6	CONCLUSION.....	18

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....19

3.1	INTRODUCTION	19
3.1.1	VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE : EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE	19
3.1.2	CHAMPS DE LA TEMPERATURE, DE LA PRESSION ET DE LA VITESSE DANS LE FOUR SOLAIRE 22	
3.1.3	CAS PRATIQUE : EBULLITION DE L'EAU DANS UNE CASSEROLE	24
3.1.4	CONCLUSION.....	27

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....28

Liste des figures

Figure 1: Four solaire de type parabolique [4]	3
Figure 2: Four solaire d'Odeillo [7].	3
Figure 3 : Four solaire à effet de serre : four solaire de type boîte [8]	4
Figure 4: Phénomène de l'effet de serre dans un four solaire de type boîte [9]	6
Figure 5 : Fabrication de deux boîtes	6
Figure 6 : Fermeture de l'espace vide	7
Figure 7 : Montage des verres	8
Figure 8 : Mesure de la température au milieu interne du four solaire (24/05/2019) à l'Université Assane Seck de Ziguinchor	11
Figure 9 : Sondes placées en différentes positions dans le four solaire	11
Figure 10 : Mesure de la température à l'intérieur de la casserole du four solaire (20/05/2019) au sein de l'université Assane Seck de Ziguinchor	12
Figure 11 : Position de la sonde à l'intérieur de la casserole avec de l'eau	12
Figure 12 : Condition aux limites dans le four solaire	15
Figure 13 : Présentation du logiciel Comsol Multiphysics.	16
Figure 14 : Différentes étapes de la simulation du fonctionnement du four solaire	17
Figure 15: Four solaire maillé avec des éléments triangulaires	18
Figure 16 : Température au milieu du four solaire en fonction du temps	19
Figure 17 : Erreur absolue du calcul de la température au milieu interne du four solaire	20
Figure 18 : Evolution temporelle de la température du côté droite.	20
Figure 19 : Erreur absolue du calcul de la température du côté droit	21
Figure 20 : Evolution temporelle de la température du côté gauche.	21
Figure 21 : Erreur absolue du calcul de la température du côté gauche	22
Figure 22: Distribution spatiale de la température dans le four solaire.	22
Figure 23 : Champ de pression dans le four solaire	23
Figure 24 : Champ de vitesse du fluide dans le four solaire.	23
Figure 25 : Casserole en aluminium	24
Figure 26 : Evolution temporelle de la température dans une casserole remplie d'eau	25
Figure 27 : Erreur absolue du calcul de la température à l'intérieur de la casserole dans le four solaire	26
Figure 28 : Champ de température du four solaire en présence de casserole.	26
Figure 29 : Cuisson des œufs avec le four solaire	27

Liste des tableaux

Tableau 1: Prix des matériaux utilisés.....	8
Tableau 2 : Dimensions du four solaire de type boîte.....	14
Tableau 3 : Propriétés physiques (conductivité thermiques, la capacité calorifique, masse volumique) des matériaux du four solaire de type boîte.....	14

Liste des abréviations

2D : Deux dimensions

C_p : Capacité calorifique thermique à pression constante ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

U : Vitesse (m. s^{-1})

μ : Viscosité dynamique (Pa.s)

p : Pression (Pa)

g : Gravité (ms^{-2})

κ : Conductivité thermique ($\text{W. m}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Q : Source de chaleur fournie par la plaque absorbante (W. m^{-3})

ρ : Masse volumique (kg. m^{-3})

h : Coefficient d'échange thermique ($\text{W. m}^{-2}\text{K}^{-1}$)

T_{ext} : Température extérieure (K)

T : Température du modèle (K)

n : Normale à la surface extérieure

ε : Emissivité

σ : Constante de Stephan-Boltzmann

I : humidité d'ordre 3

Introduction générale

Les sources d'énergies habituellement utilisées pour la cuisson sont le charbon, le gaz naturel, l'électricité et le bois. L'utilisation de ces énergies est plus ou moins néfaste pour l'environnement ; le charbon et le gaz sont des combustibles fossiles. Ils dégagent des gaz contribuant à l'augmentation de l'effet de serre [1].

C'est ainsi que des pays comme l'Inde, l'Indonésie, Chine et le Sénégal ont mis en place des programmes de recherche et de valorisation de l'énergie solaire qui est une aubaine pour l'homme car elle est quasi-inépuisable.

Parmi les technologies utilisant l'énergie solaire, nous pouvons citer le four solaire qui existe sous plusieurs formes (parabolique, à panneau, de type boîte, etc.) même si le principe de fonctionnement est quasiment le même.

Dans ce travail, nous nous focalisons sur le four solaire de type boîte car ce dernier est facile à fabriquer. Il semble également être une bonne alternative à l'utilisation domestique du bois (lutte contre la déforestation) et du gaz (énergie fossile) en Afrique et particulièrement dans la région naturelle de la Casamance au Sud du Sénégal où la déforestation est intense. En termes d'exemple, les énergies fossiles représentent 84,7% de la consommation mondiale d'énergie en 2018 [2]. Cette nouvelle situation fait appeler à une prise de conscience collective de l'utilisation des ressources naturelles.

C'est pourquoi, face à une telle situation qui risque de marquer une crise financière et environnementale, le recours au four solaire apparaît comme une alternative intéressante pour répondre à ces besoins vitaux sans pour autant compromettre la biodiversité végétale et tout en limitant le dégagement des gaz à effet de serre [3].

La présente étude a pour objectif générale de valider l'étude expérimentale. Pour atteindre cet objectif, une construction numérique du four solaire de type boîte sera réalisée. Elle permet de prédire l'évolution temporelle et spatiale des paramètres physiques (température, vitesse du fluide et pression) dans le modèle. Ce mémoire comporte trois chapitres et est organisé de la façon ci-dessous.

Le premier chapitre porte sur le choix d'un four solaire de type boîte connaissant ces caractéristiques et son fonctionnement. Une expérience sera réalisée en utilisant des thermocouples. Le deuxième chapitre présente la simulation numérique du modèle choisi connaissant ces propriétés physiques. Le troisième chapitre porte sur la comparaison entre les données numériques et expérimentales et leurs validations.

CHAPITRE 1: Généralités du four solaire

1.1 Introduction

Depuis quelques années, l'utilisation des énergies fossiles est remise en question autant sur leurs durabilités que sur leurs impacts dans le changement climatique. Sans aucun doute, l'énergie solaire est une vraie aubaine pour l'homme car elle est quasi-inépuisable.

La limitation de la quantité de ces réserves, les crises successives du pétrole et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement comme le four solaire.

En effet, le four est lié à une activité humaine fréquente et très régulière : il s'agit de la cuisson des aliments. Le four solaire est donc à ce jour une des solutions les plus écologiques. En effet, c'est un appareil qui transforme en chaleur des rayonnements lumineux émis par le soleil.

Nous allons procéder à l'étude, à la réalisation d'un four solaire qui permet la satisfaction des besoins énergétiques de base [1].

1.2 Différents fours solaires

1.2.1 Fours solaires paraboliques

Les fours solaires paraboliques permettent de concentrer l'ensemble des rayons lumineux qui touchent la parabole en un point où l'on place le plat de cuisson.

Ils sont constitués de réflecteurs paraboliques et d'une marmite recouverte d'une couverture transparente permettant l'effet de serre.

La puissance de ces dispositifs dépend de la taille de la parabole. Ces modèles atteignent rapidement de très hautes températures (200 à 500°C pour certains).

Cependant ils sont difficiles à utiliser à cause de la température qui est très élevée. La fabrication de ce modèle est également très compliquée [1].



Figure 1: Four solaire de type parabolique [4]

1.2.2 Four solaire d'Odeillo

Le four solaire d'Odeillo est un four parabolique, le plus puissant au monde. Dans ce modèle, le miroir à gauche parabolique concentre les rayons du soleil. A droite, les 63 héliostats réfléchissent les rayons vers le miroir parabolique.

Il permet de faire l'étude et l'élaboration des matériaux soumis à des conditions extrêmes (espace, aéronautique, industries de pointe, fusion nucléaire), le développement de procédés de production des carburants synthétiques comme l'hydrogène et le craquage de l'eau pour produire de l'hydrogène.

Nous obtenons en quelques secondes des températures supérieures à 3500°C [5].

Mais il peut causer des brûlures ou même abîmer les yeux à cause de la réflexion des rayons du soleil et ce four est difficile à fabriquer [6].



Figure 2: Four solaire d'Odeillo [7].

1.2.3 Fours solaires de type boîte

Les fours solaires de type boîte sont construits à base de carton ou de bois, de papier aluminium, d'un isolant thermique comme le polystyrène ou le coton, d'un double vitrage et d'un réflecteur externe. Ce sont des boîtes qu'on peut utiliser pour cuire des aliments et même chauffer de l'eau à partir des rayons UV provenant du soleil.

Ils sont faciles à fabriquer, peu encombrants et simples à utiliser. Aussi, la cuisson lente préserve le goût des aliments. Ils ne causent aucun risque d'incendie, aucune fumée lors de la cuisson et cela réduit ainsi les cas de maladies (pulmonaire) des yeux causés par la fumée. Autrement dit-il offre une alternative non polluante à l'environnement

Durant la cuisson nous pouvons nous occuper d'autres tâches ménagères. Ils offrent une alternative non polluante à l'environnement car ils ne dégagent pas de gaz, ni de fumée [1].

Cependant, la durée de cuisson du four solaire est bien supérieure à celle des cuissons traditionnelles. Les fours solaires sont donc lents par rapport à la cuisson traditionnelle. Ce sont des appareils qui ne sont pas faciles à transporter et dépendent du bon vouloir du soleil. Le temps de cuisson dépend du degré d'ensoleillement et le type de casserole utilisée.



Figure 3 : Four solaire à effet de serre : four solaire de type boîte

1.3 Le Fonctionnement du four solaire

Le fonctionnement d'un four solaire est un procédé de chauffage reposant sur l'intensité des rayons solaires émis et leur conversion en chaleur. Cette concentration d'énergie permettra la réutilisation de la chaleur obtenue selon la capacité du four solaire.

Autrement dit les rayons qui pénètrent à l'intérieur du four solaire sont piégés après transformation en rayons infrarouge. Cette conservation de la chaleur à l'intérieur de l'enceinte provoque une augmentation de la température à l'intérieur du four solaire.

Les différents composants du four solaire sont :

1.3.1 Les réflecteurs

Les réflecteurs fournissent au four un apport indispensable d'énergie c'est-à-dire ils permettent d'atteindre une température importante car ils ont pour rôle de renvoyer plus de rayons vers l'intérieur du four [9].

1.3.2 Le papier aluminium

Les rayons lumineux UV convertissent en l'infrarouge, circulent à l'intérieur du four solaire et provoquent l'échauffement du récipient.

Ainsi, pour envoyer une quantité plus importante de rayons, du papier aluminium est placé sur les parois internes du four. Celui-ci étant constitué d'une surface réfléchissante, va renvoyer la quasi-totalité des rayons UV vers l'intérieur et donc le concentrer vers le fond.

L'utilisation de l'aluminium dans le cas d'un four solaire permet de concentrer la quasi-totalité de la lumière reçue vers le fond du four [9]. C'est-à-dire le choix de l'aluminium pour les réflecteurs se base sur le fait qu'il ait une très bonne capacité à réfléchir les rayons lumineux qui arrivent aux niveaux des bords internes du modèle [10].

1.3.3 La plaque absorbante

Déposée au fond du four solaire, la plaque noire qui joue le rôle d'un corps noir absorbe totalement les rayons solaires UV qu'elle reçoit. Dans ce cas, ces rayons UV absorbés par la plaque absorbante seront transformés en rayons infrarouges [9].

1.3.4 Le double vitrage

Le double vitrage est une matière qui est transparente aux rayons UV provenant du soleil. Ces rayons qui pénètrent à l'intérieur du four solaire sont absorbés par le corps noir qui les transforme en rayons infrarouge moyens et lointains. Cependant, le double vitrage est imperméable aux rayons infrarouges (moyens et lointains) émis par le corps noir.

Il va donc permettre la traversé des rayons UV vers l'intérieur du modèle mais les empêche de sortir après leurs transformation en infrarouge. Autrement dit, les rayons infrarouges sont bloqués par le double vitrage qui minimise les pertes thermiques de la chaleur vers le milieu ambiant. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre et qui explique le phénomène physique [9] d'augmentation de la température dans le four.

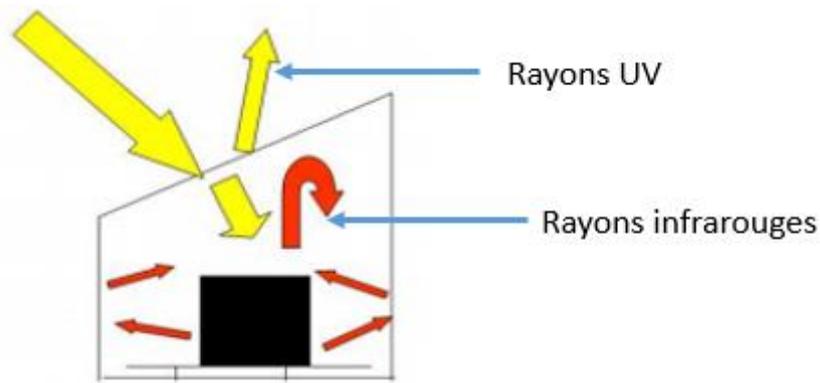


Figure 4: Phénomène de l'effet de serre dans un four solaire de type boîte [9]

1.4 Processus de fabrication du four solaire de type boîte

L'utilisation du bois rouge pour la fabrication du modèle boîte n'est pas hasardeux il est choisi pour faire face à la pluviométrie qui est très abondante en Casamance et aussi aux insectes tels que les termites puisque ce bois est très dur, et résiste à l'attaque de ces derniers. Aussi, son huile protège le bois des parasites [11].

La fabrication de ce modèle se fait en plusieurs étapes dont :

Le rabotage du bois rouge au niveau des machines avant la fabrication des deux boîtes de dimensions différentes.

Le contreplaqué est utilisé pour fermer le fond des deux boîtes comme l'explique le schéma ci-dessous.

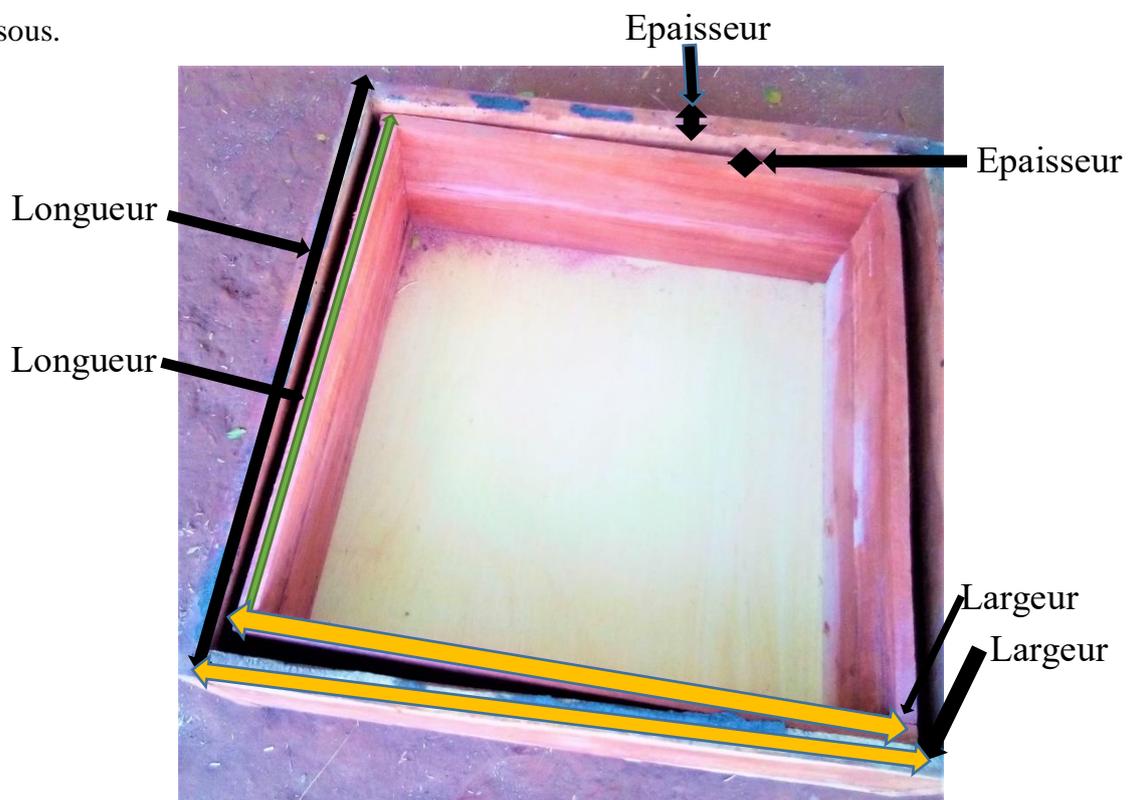


Figure 5 : Fabrication de deux boîtes

Puisque les deux boîtes n'ont pas la même hauteur, le fond et les bords de la première boîte sont remplis avec des isolants thermiques comme le copeau de bois de telle sorte que les deux puissent avoir le même niveau à la surface. Ensuite, l'espace vide entre les deux est occupé par un isolant afin d'éviter les pertes de chaleur. Le fond et les bords de la boîte sont enfin recouverts d'une peinture noire. Les bords internes de la petite boîte sont tapissés avec du papier aluminium. Il existe d'autres isolants thermiques tels que le coton, le polystyrène. Le choix de l'isolant thermique dépend de la disponibilité sur le marché mais aussi la durabilité et cout.

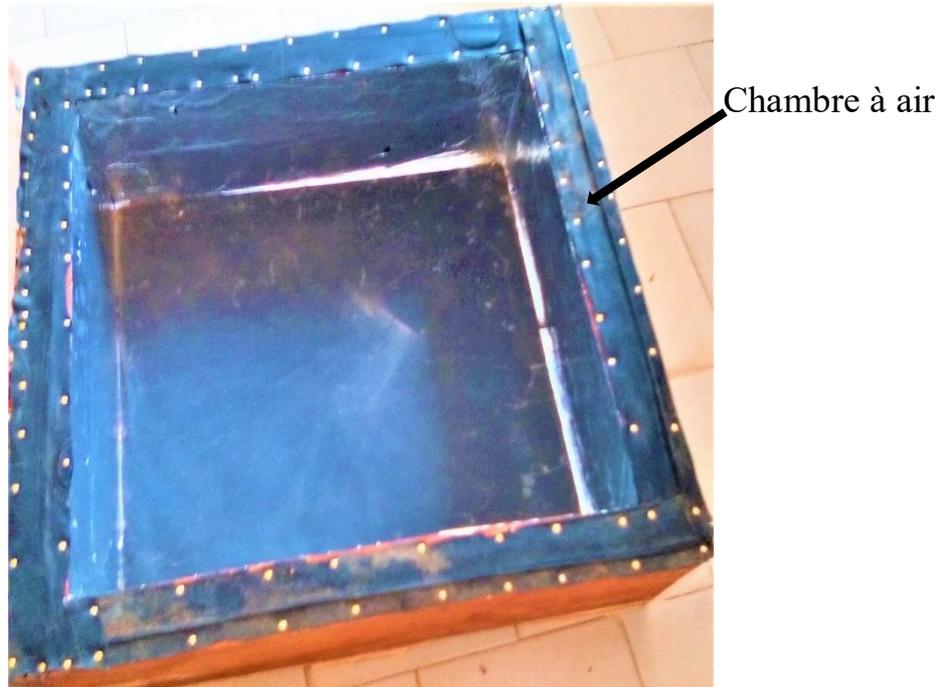


Figure 6 : Fermeture de l'espace vide

La dernière phase consiste à monter le verre blindé et le réflecteur externe à la surface du modèle.

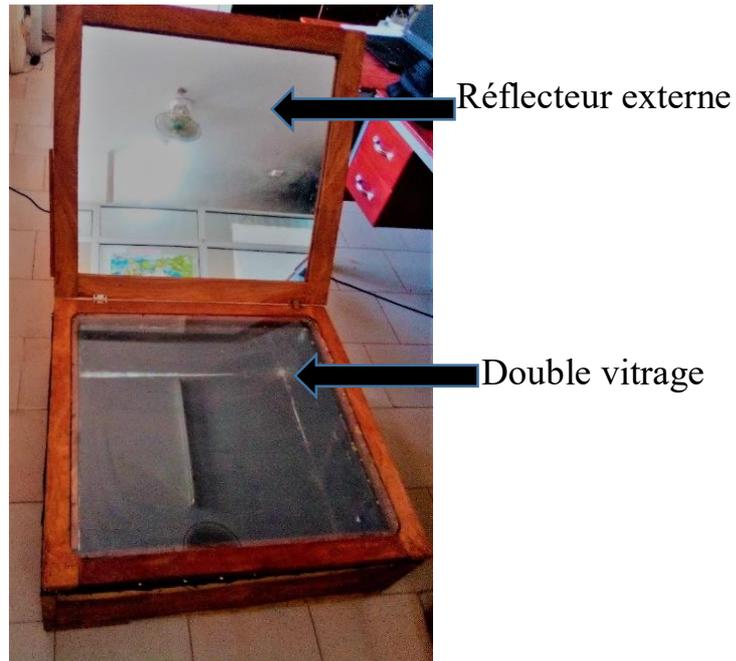


Figure 7 : Montage des verres

1.5 Le prix du four solaire.

Une estimation du prix de notre modèle permettra aux utilisateurs d'être informés du coût réel de ce modèle car l'énergie solaire pour la cuisson n'a pas de conséquences sur l'environnement.

Tableau 1: Prix des matériaux utilisés

Composants	Prix
Miroir	7500F
Bois rouge	10000F
Pommelle	3000F
Papier en aluminium	1500F
Copeau de bois	1000F
Contre plaqué	5500F
Peinture noire	1500F
Rabotage	500F
Main d'oeuvre	6000F
Transport	2000F
Total	38500F

1.6 Impact des conditions environnementales sur le fonctionnement du four solaire.

Les conditions extérieures qui entraînent une diminution des rayons sont les conditions météorologiques (vent fort, pluie, couverture nuageuse et manque général d'ensoleillement) et l'espace limité pour utiliser le four. La condition extérieure qui peut favoriser l'utilisation de la cuisson solaire est tout d'abord le rayonnement solaire.

Dans certaines zones, les maisons sont très proches les unes des autres. L'ombre des bâtiments entraîne un ensoleillement insuffisant. Autrement dit le four solaire doit être dans un milieu libre (absence d'ombre) pour assurer son bon fonctionnement.

Les cuisinières solaires présentent alors plus d'avantages dans les régions où l'ensoleillement est intense comme la majorité des pays africains. La construction du four solaire entraîne une réduction d'utilisation des combustibles fossiles. Ce qui peut convaincre les utilisateurs à adopter cette nouvelle technologie bien que la cuisson avec le bois est plus rapide [12].

1.7 Aspects socio-économique

Dans les années à venir, les ressources fossiles telles que le gaz et le pétrole, seront de plus en plus rares. Par conséquent, le prix de ces ressources deviendra de plus en plus important. Le soleil est une ressource inépuisable à l'échelle humaine et ne consomme aucune matière première. Le four solaire est pratique et bénéfique pour la santé car le cuiseur solaire ne dégage aucune fumée lors de la cuisson.

1.8 Conclusion

L'étude bibliographique du four solaire a permis de constater que parmi les différents fours solaires, celui de type boîte est plus adapté à notre environnement, plus simple à fabriquer et facile à utiliser. En effet, il a été reconnu que les ménages à faibles revenus souffrent de pénuries générales d'énergie, notamment pour fournir une énergie sûre et adéquate pour la cuisson. L'étude du four solaire de type boîte sert en vérité non seulement à la protection de l'environnement, mais aussi à diminuer les gaz à effet de serre qui sont une menace pour l'atmosphère.

Outre les avantages évidents des fours solaires pour les utilisateurs de bois de chauffe, une meilleure compréhension de l'utilisation de l'énergie solaire par les ménages permet aux utilisateurs des combustibles commerciaux plus coûteux de faire des économies monétaires.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

2.1 Introduction

La simulation numérique nous offre la possibilité de concevoir un modèle, en intégrant toutes les caractéristiques, et de regarder le comportement du système étudié sur les différentes variables. Elle permet aussi d'étudier le fonctionnement et les propriétés physiques d'un système modélisé [13]. C'est un procédé selon lequel, on exécute un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique. Comme la variation du rayonnement lumineux à l'intérieur du four solaire en fonction de la température.

Dans cette partie, un modèle numérique a été développé via la méthode des éléments finis et dans le but de simuler le comportement du four solaire de type boîte dans les conditions réelles. Celui-ci prend en compte le changement de température, la vitesse du fluide (vent) et la pression dans le four solaire. C'est donc le couplage de plusieurs phénomènes physiques dont la résolution sera faite par le logiciel Comsol Multiphysics [14].

Afin de s'assurer de sa fiabilité, une instrumentation (expérience) a été faite afin de valider ultérieurement les résultats numériques qui seront obtenus.

2.2 Expérience

L'expérimentation s'articule autour de deux parties :

La première nécessite quatre thermocouples placés à différentes positions en branchant les sondes aux multimètres. Ceux-ci mesurent la température ambiante, la température à la surface du verre, au milieu interne, et celle au fond du four solaire comme le montre la figure(8).

Les sondes sont constituées de thermocouples de type K, d'un connecteur de fiche à prise miniature et d'un capteur qui est à la pointe de la sonde. L'incertitude de mesure des multimètres est de $\pm 3\%$ et le domaine de validé de mesure de la sonde de température flexible est compris entre $[-50^{\circ}\text{C}$ et $+200^{\circ}\text{C}$] [15].



Figure 8 : Mesure de la température au milieu interne du four solaire (24/05/2019) à l'Université Assane Seck de Ziguinchor

La figure (9) montre la position des sondes placées dans le modèle. La sonde 1 mesure la température ambiante ou externe des rayons UV. Les sondes 2 et 3 donnent la température à la surface externe du verre et au milieu interne du modèle. La sonde 4 mesure celle au fond du modèle.

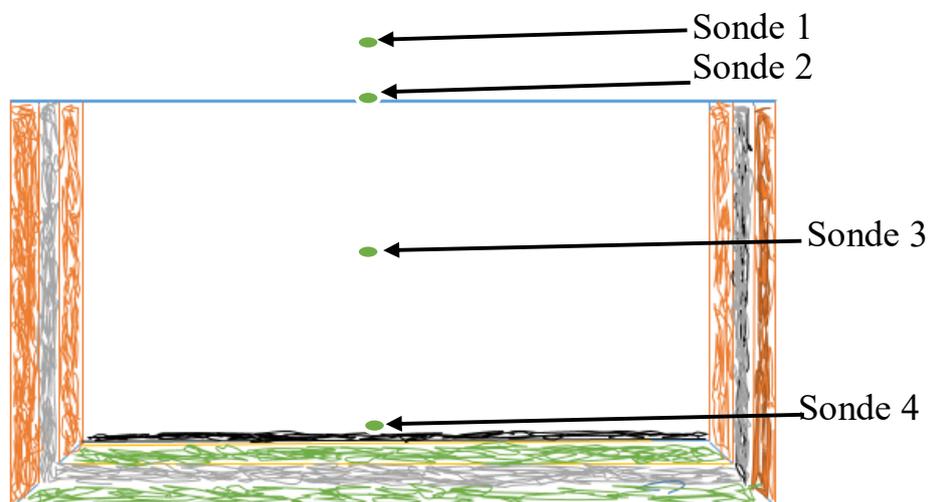


Figure 9 : Sondes placées en différentes positions dans le four solaire

En ce qui concerne la deuxième expérience, la sonde à la température ambiante et celle au fond de la plaque sont conservées. D'autres sondes sont placées : à l'intérieur de l'eau qui se trouve dans la casserole et aux niveaux des bords. Ceci permet de mesurer l'évolution de la température en fonction du temps.



Figure 10 : Mesure de la température à l'intérieur de la casserole du four solaire (20/05/2019) au sein de l'université Assane Seck de Ziguinchor

Les deux expériences ont été réalisées pour intervalle de temps de 7h à 18h .Les mesures expérimentales ont montrées que la température était devenue importante entre 9h et 15h.Cette évolution provient de l'intensité du soleil.

La position de la sonde à l'intérieur de la casserole en présence d'eau et aux niveaux des bords sont présentées par la figure (11).

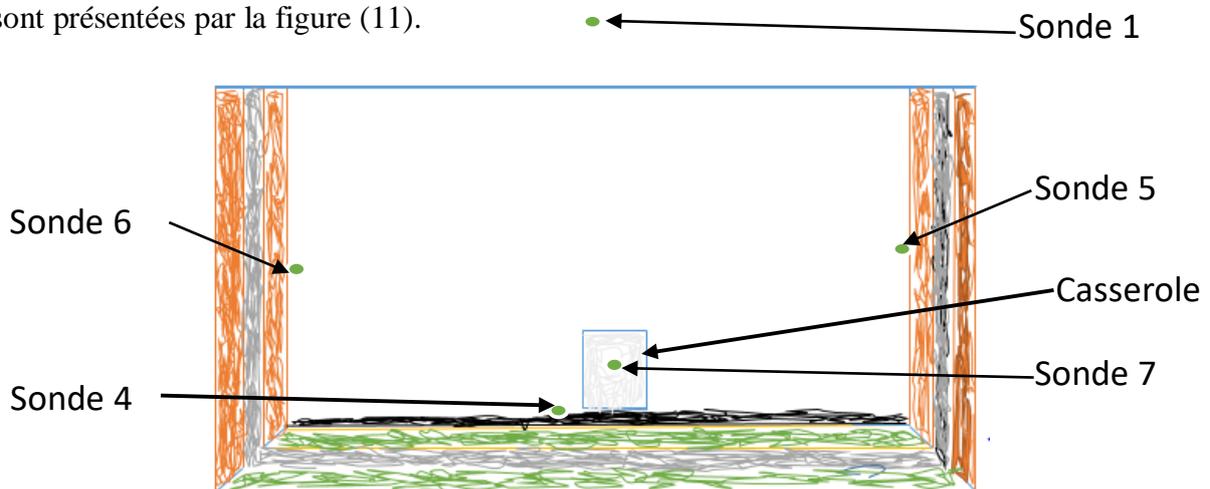


Figure 11 : Position de la sonde à l'intérieur de la casserole avec de l'eau

Nous allons conserver la position des sondes 1 et 4 dans ce modèle. La température à ces points est considérée comme étant une donnée d'entrée du modèle numérique. La sonde 7 mesure la température de l'eau à l'intérieur de la casserole.

2.3 Modélisation numérique

2.3.1 Equations physiques

Le modèle mathématique modélisant la répartition de la chaleur, de la vitesse du fluide et de la pression dans le four solaire est le couplage de deux physiques : thermique et fluide

L'équation de transfert de la chaleur couplée aux équations de Navier-Stokes modélise la transmission de la chaleur par conduction dans le solide et par convection dans le fluide ainsi que la variation de la vitesse du fluide et de la pression.

- L'écoulement du fluide non isotherme est modélisé par les équations suivantes.

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \rho\mathbf{g} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$\mathbf{u}(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ la vitesse, $\mu(\text{Pa} \cdot \text{s})$ la viscosité dynamique, $p(\text{Pa})$ la pression, $\mathbf{g}(\text{ms}^{-2})$ la gravité \mathbf{I} l'humidité d'ordre 3.

Dans ce cas-ci, la masse volumique de l'air est donnée par la loi des gaz parfaits suivante.

$$pV = nRT \quad \text{avec } n = \frac{m}{M} \quad \text{or } \rho = \frac{m}{V} \quad \longrightarrow \quad \frac{m}{V} = \rho = \frac{MP}{RT}$$

- Le transfert de chaleur dans les solides est modélisé par :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (2)$$

$$\text{Avec } \mathbf{q} = -\kappa \nabla T$$

Où $C_p(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1})$ est la capacité calorifique thermique à pression constante, $\kappa(\text{W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1})$ la conductivité thermique, $Q(\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$ la source de chaleur fournie par la plaque absorbante et $\rho(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ la masse volumique.

- Le transfert de chaleur dans le fluide est :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

Le four solaire de type boîte étudié dans ce travail est composé de différentes pièces dont les dimensions sont données sur le tableau 2

Tableau 2 : Dimensions du four solaire de type boîte.

Dimensions	Grande boîte	Deuxième boîte	Verre
Longueur (cm)	80	72	70.07
Largeur (cm)	80	70	69.05
Epaisseur (cm)	3	3	0,4
Hauteur (cm)	28	24	

Les propriétés physiques des différents matériaux utilisés pour la fabrication du modèle sont données dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 : Propriétés physiques (conductivité thermique, la capacité calorifique, masse volumique) des matériaux du four solaire de type boîte.

Matériaux	Conductivité thermique (W. m ⁻¹ . K ⁻¹)	Masse volumique ρ (kg. m ⁻³)	Capacité calorifique (J. kg ⁻¹ . K ⁻¹)	Emissivité
Bois rouge [16]	0.12 à 0.212	470 à 873	1850	0.83
Verre	1.4	2530	840	0.92
Contreplaqué [17]	0.1032	404	1850	
Copeau de bois [18]	0.04 à 0.7	90 à 120	1600 à 2300	
Aluminium	238	2700	900	

2.3.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont les suivantes :

- Un flux de chaleur convectif (rayonnement UV entrant dans le modèle) et appliqué sur la vitre extérieure :

$$q = h (T_{\text{ext}} - T) \quad (4)$$

Avec h ($W.m^{-2}K^{-1}$) le coefficient d'échange thermique, $T_{ext}(K)$ la température extérieur, $T(K)$ la température du modèle.

- Les autres surfaces extérieures sont isolées thermiquement comme le montre la figure (12) :

$$-n \cdot q = 0 \quad (5)$$

Avec \mathbf{n} la normale à la surface extérieur

- Les surfaces intérieures sont soumises à un rayonnement surface-surface.

Celle-ci est aussi soumise à un rayonnement avec le milieu extérieur.

$$-n \cdot q = \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \quad (6)$$

Avec ε l'émissivité et σ constante de Stephan-Boltzmann

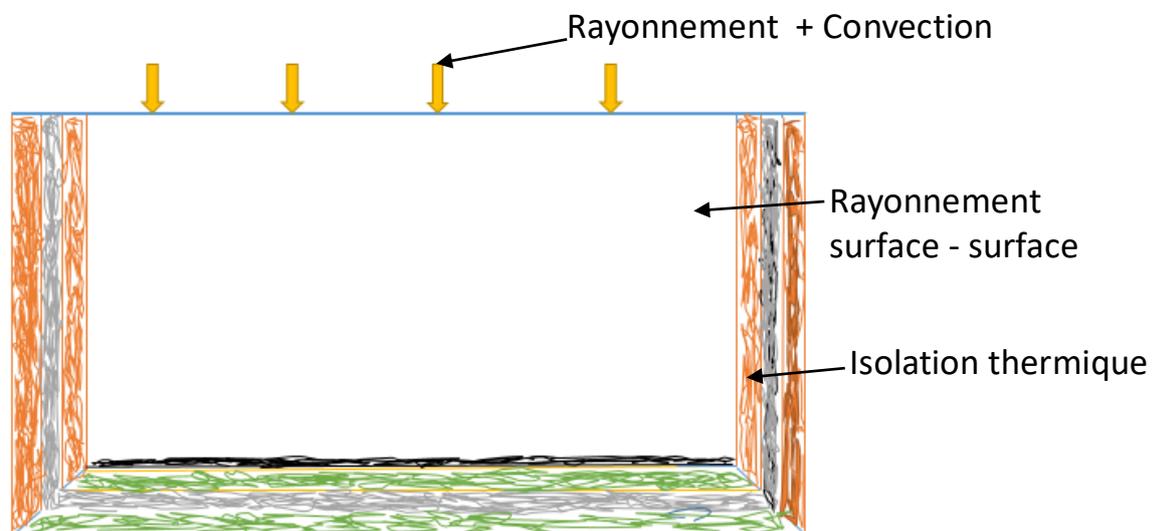


Figure 12 : Condition aux limites dans le four solaire

2.3.3 Conditions initiales

La température initiale est celle de l'air ambiante (300K), la pression atmosphérique est de 1 atm et la vitesse du fluide est nulle.

2.4 Présentation de Comsol multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel développé par la méthode des éléments finis et permettant de résoudre des systèmes d'équations différentielles. Ce logiciel de simulation numérique est capable de simuler quasiment tous les phénomènes physiques et de nombreuses applications (électriques, mécaniques ou chimiques) [19]. Le problème peut être résolu aussi bien en régime stationnaire qu'en régime temporel. Il est reconnaissable par l'interface graphique sur la figure (13).

Dans ce logiciel, la première partie permet de définir le problème à étudier. Elle regroupe les variables et les paramètres du problème.

La deuxième permet d'entrer les données relatives aux modèles sélectionnés dans la première partie. C'est dans cette phase que sont choisies les équations modélisant le phénomène physique, les valeurs initiales et les conditions aux limites de la simulation.

La troisième permet la visualisation de la géométrie et le maillage du système.

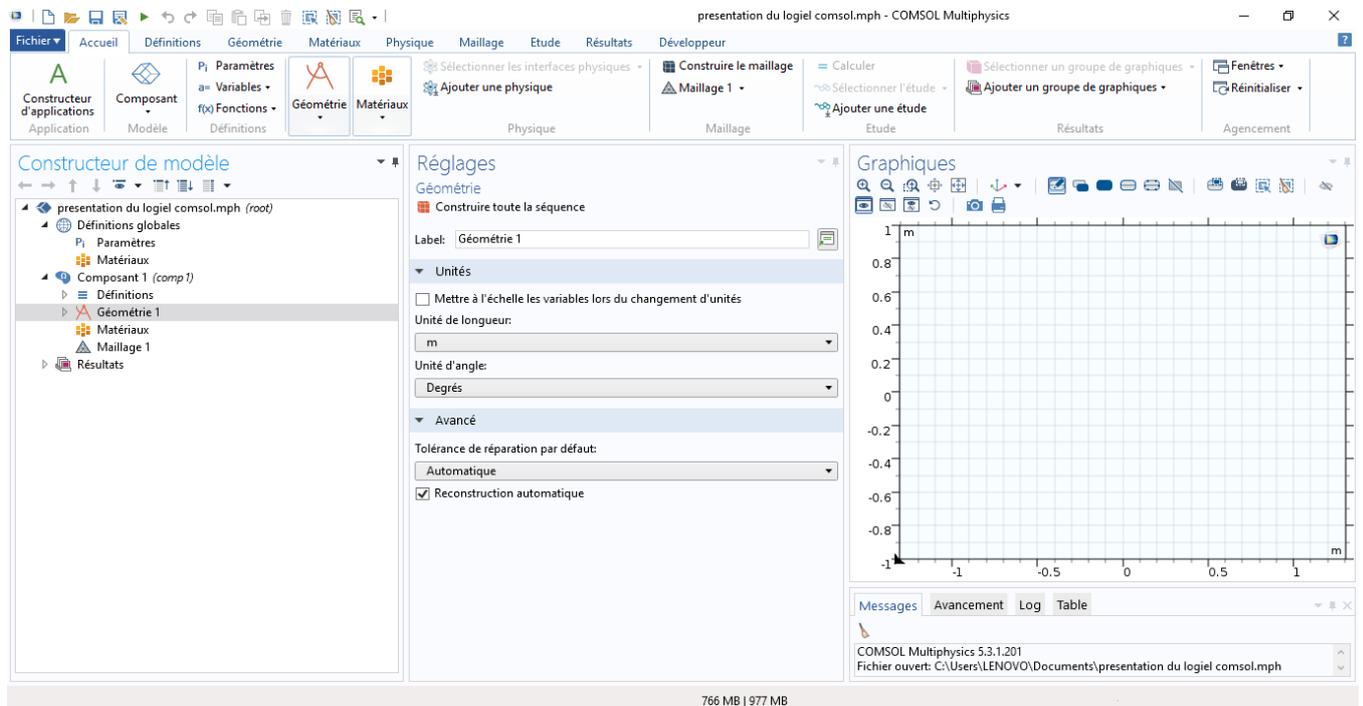


Figure 13 : Présentation du logiciel Comsol Multiphysics.

2.5 Description du modèle.

Le modèle choisi pour notre étude est un four solaire constitué d'un seul réflecteur externe avec un double vitrage à la surface et une plaque absorbante au fond du système sur laquelle on dépose le dispositif de cuisson des aliments.

Les matériaux utilisés dans la simulation de notre modèle ainsi que leurs paramètres seront définis lors de la simulation numérique avec COMSOL Multiphysics.

Une simulation numérique du système à 2D a été mise en œuvre en vue de prédire les performances de notre four solaire en conditions réelles.

Les étapes à suivre pour le déroulement de la simulation sur le logiciel COMSOL sont présentées par la figure (14). Comsol Multiphysics est un logiciel qui fragmente la géométrie en un grand nombre de petits morceaux (appelés maillage) et résout les équations de la physique par la méthode des éléments finis sur ces petites parties en respectant les conditions aux limites.

Cette étape sert à définir les volumes élémentaires pour permettre la discrétisation du système. Pour discrétiser le problème, il est nécessaire d'effectuer un maillage du domaine d'étude [19].

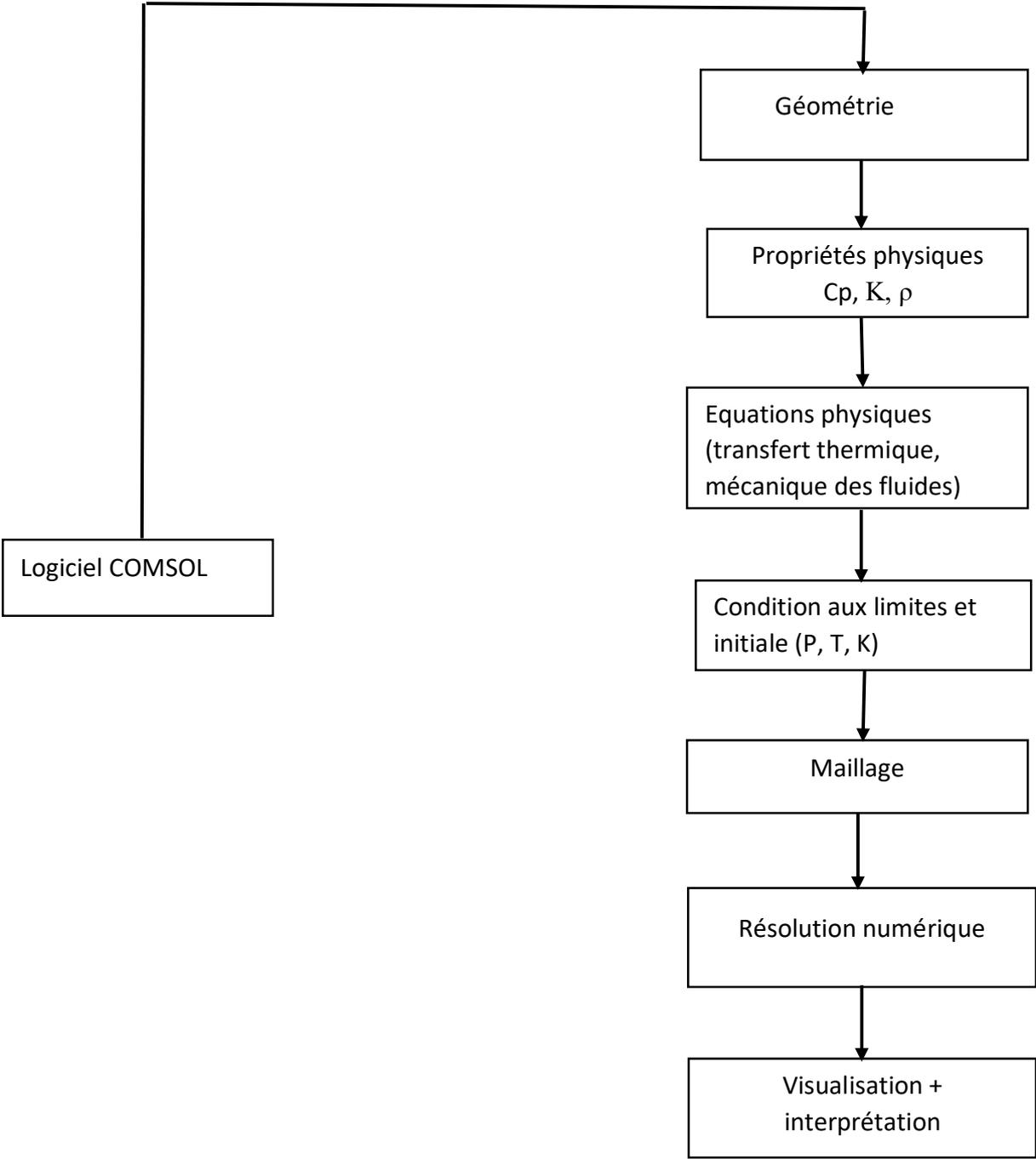


Figure 14 : Différentes étapes de la simulation du fonctionnement du four solaire

La figure (15) montre bien le four solaire maillé et ce système comporte des éléments triangulaires. Le pas de temps du solveur temporel est choisi de façon progressive pour éviter le problème de convergence en début de simulation.

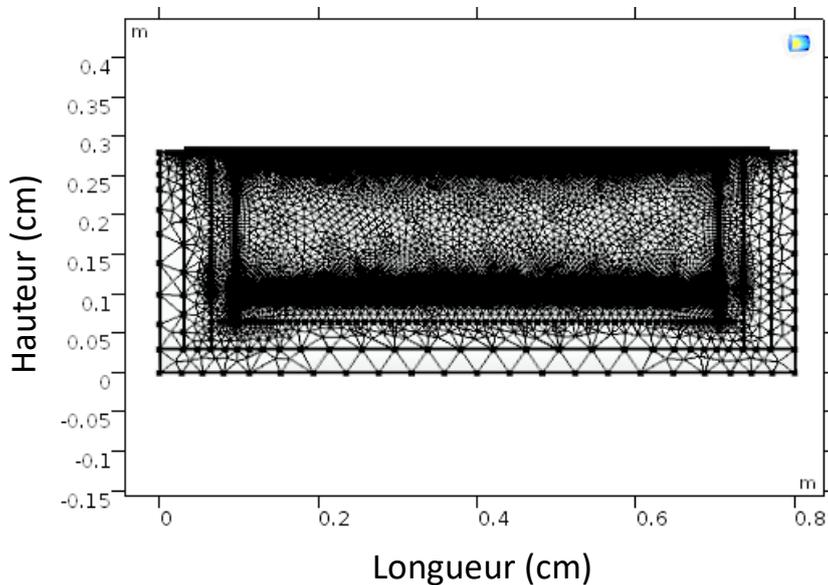


Figure 15: Four solaire maillé avec des éléments triangulaires ;

2.6 Conclusion

Ce travail, bien que préliminaire, a permis de construire un modèle numérique qui a pour objectif de simuler le fonctionnement d'un four solaire de type boîte. Ce dernier prend en compte la variation temporelle et spatiale des paramètres physiques tels que la température, la pression et la vitesse du fluide dans le four. Le couplage des équations est traité par le logiciel Comsol Multiphysics.

Une partie expérimentale a été mise en place afin de vérifier la validité des résultats numériques obtenus. La comparaison des résultats numériques avec les résultats de l'expérience va permettre de juger de la fiabilité, de la robustesse et même de la précision du modèle numérique développé.

Chapitre 3 : Résultats et discussions

3.1 Introduction

La construction du modèle numérique étant faite dans le chapitre précédent, il est important de le tester et le valider afin de nous assurer de sa fiabilité. Pour cela, les résultats numériques obtenus seront comparés avec les données mesurées expérimentalement.

La résolution des équations modélisant le fonctionnement du four solaire sera faite par Comsol Multiphysics, un logiciel commercial développé via la méthode des éléments finis. Il nous offre la possibilité de voir la répartition spatiale et temporelle de la température, du champ de vitesse et de la pression dans le fluide.

3.1.1 Validation du modèle numérique : Evolution temporelle de la température

Nous avons placé quatre sondes afin de mesurer la température à plusieurs positions dans le four solaire. Un des thermocouples de validation est placé au milieu du four, les autres mesurent la température à l'extérieur du four, au fond du modèle sur la plaque absorbante et à la surface externe du verre comme l'illustre la figure (9).

La figure (16) représente l'évolution de la température en fonction du temps au milieu interne du modèle. La comparaison des résultats obtenus numériquement avec ceux de l'expérience montre une parfaite adéquation. On y constate des valeurs de température au-delà des 100°C au milieu du four à l'heure où l'ensoleillement est le plus important c'est-à-dire vers 13h30.

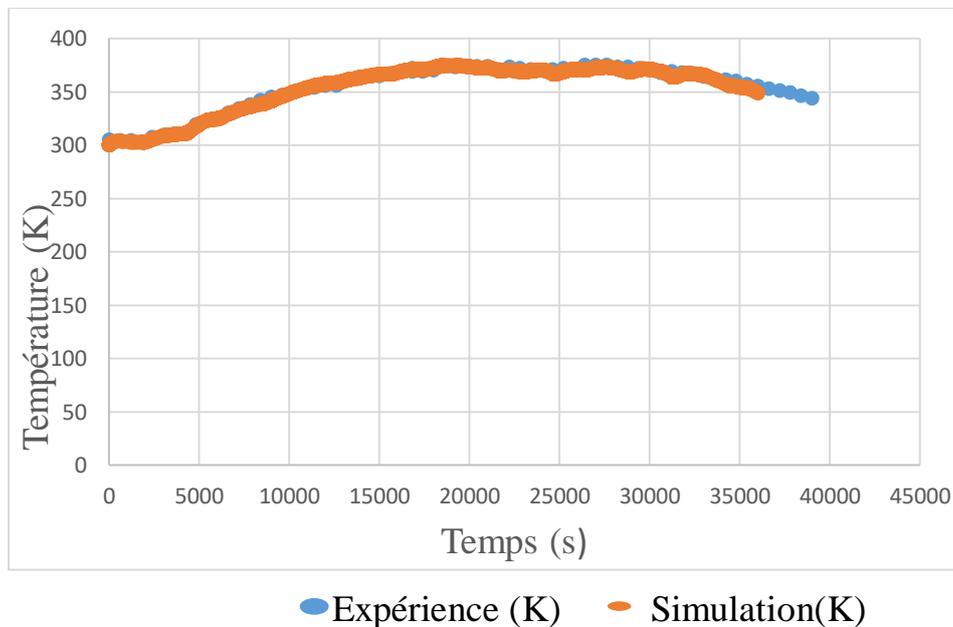


Figure 16 : Température au milieu du four solaire en fonction du temps

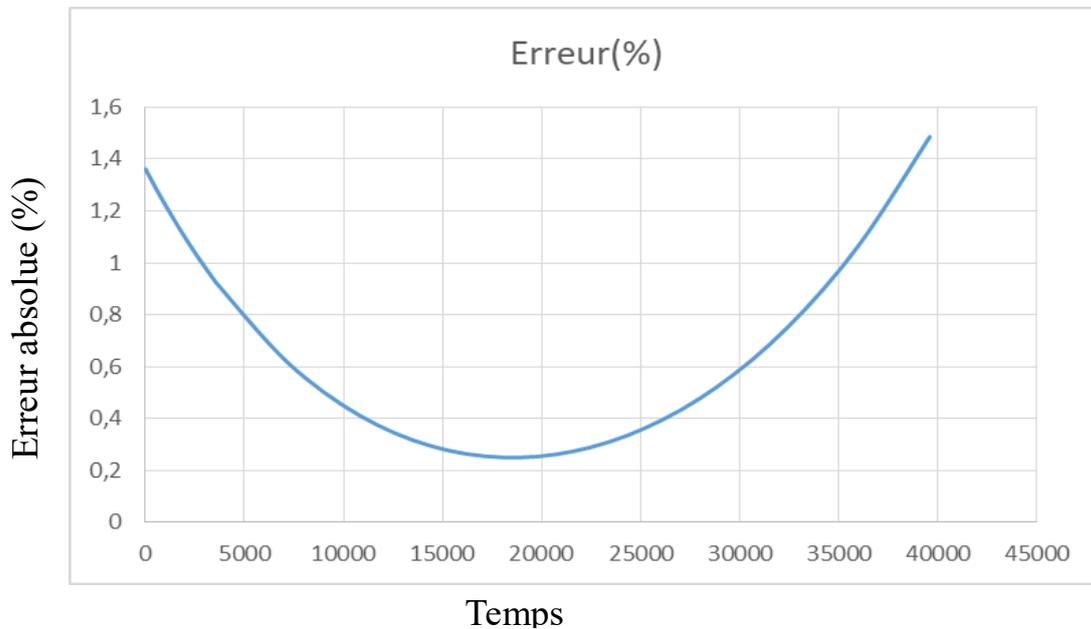
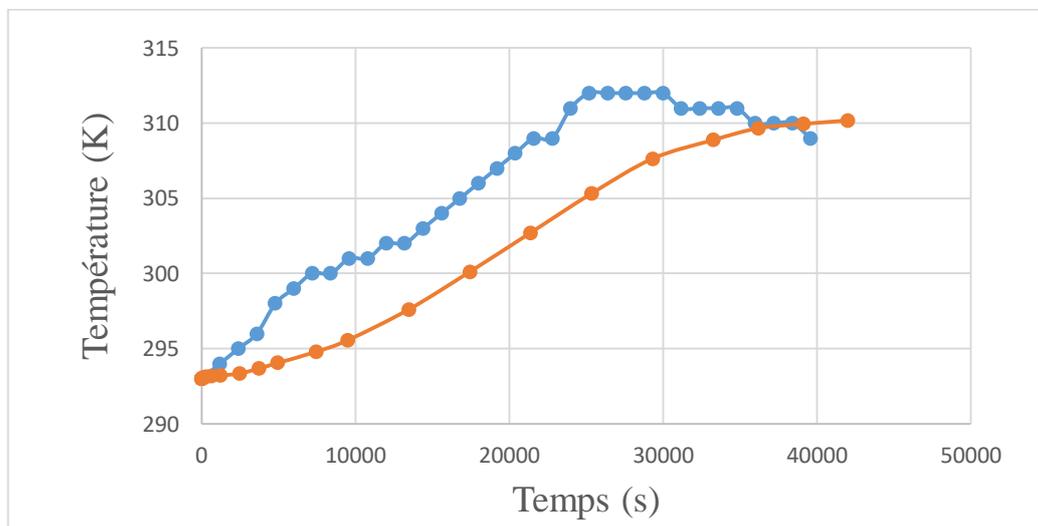


Figure 17 : Erreur absolue du calcul de la température au milieu interne du four solaire

L'erreur absolue du calcul de la température au milieu interne du modèle présente de très faibles valeurs (1,4%). Les autres cas représentent l'évolution de la température en fonction du temps sur les bords internes du four solaire. Les figures (19) et (21) donnent l'évolution temporelle (numérique et expérimentale) de la température sur respectivement le bord interne droit et le bord interne gauche. Dans les deux cas, les valeurs ne dépassent pas les 40°C et ceci illustre bien le fait que la chaleur est moins élevée sur les bords.



● Expérience ● Simulation

Figure 18 : Evolution temporelle de la température du côté droit.

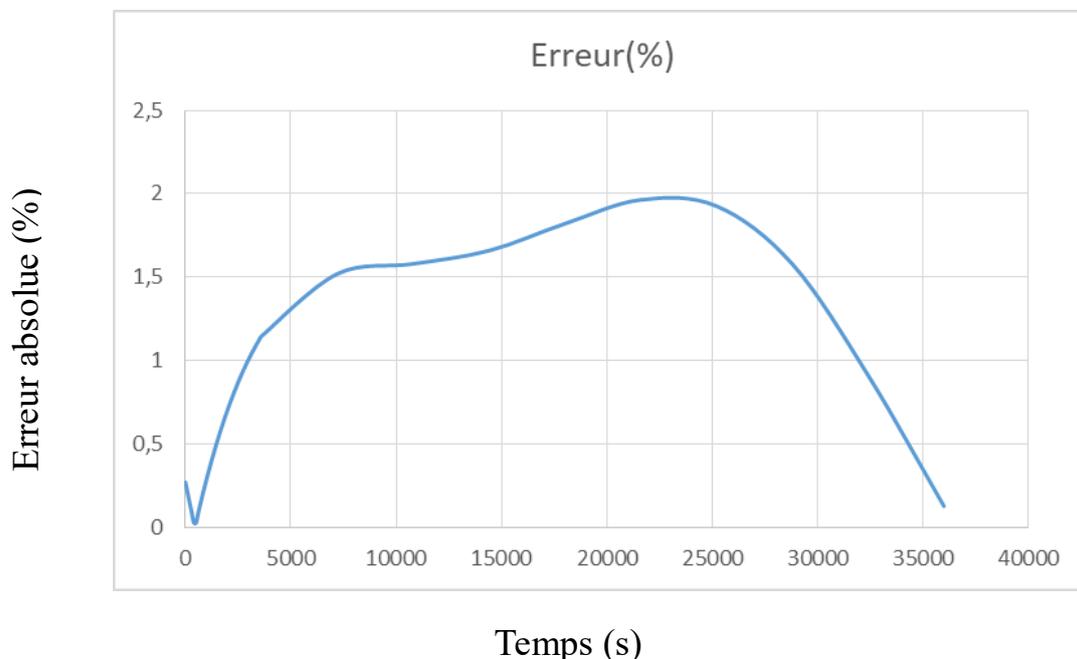


Figure 19 : Erreur absolue du calcul de la température du côté droit

L'erreur absolue du calcul de la température sur les bords internes du four montre également de très faibles valeurs puisqu'elle ne dépasse pas 2,7% pour le côté gauche et 2% pour le côté droit comme le montrent les figures (20) et (22). Ceci permet de dire que le modèle numérique simule avec précision le fonctionnement du four solaire étudié dans ce travail de recherche.

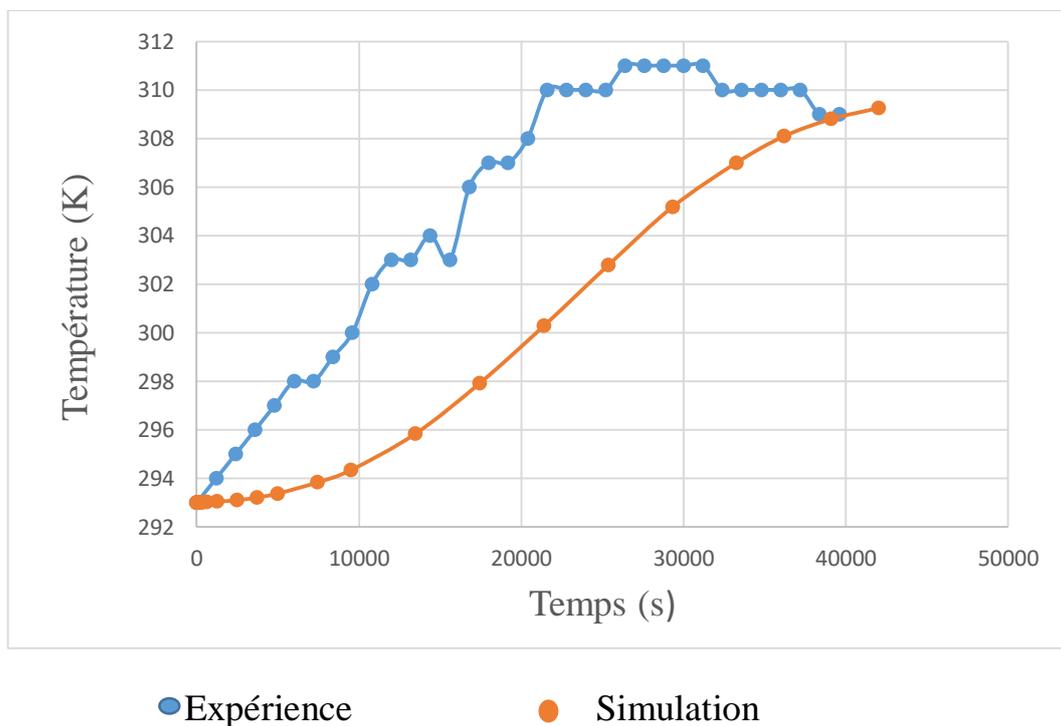


Figure 20 : Evolution temporelle de la température du côté gauche.

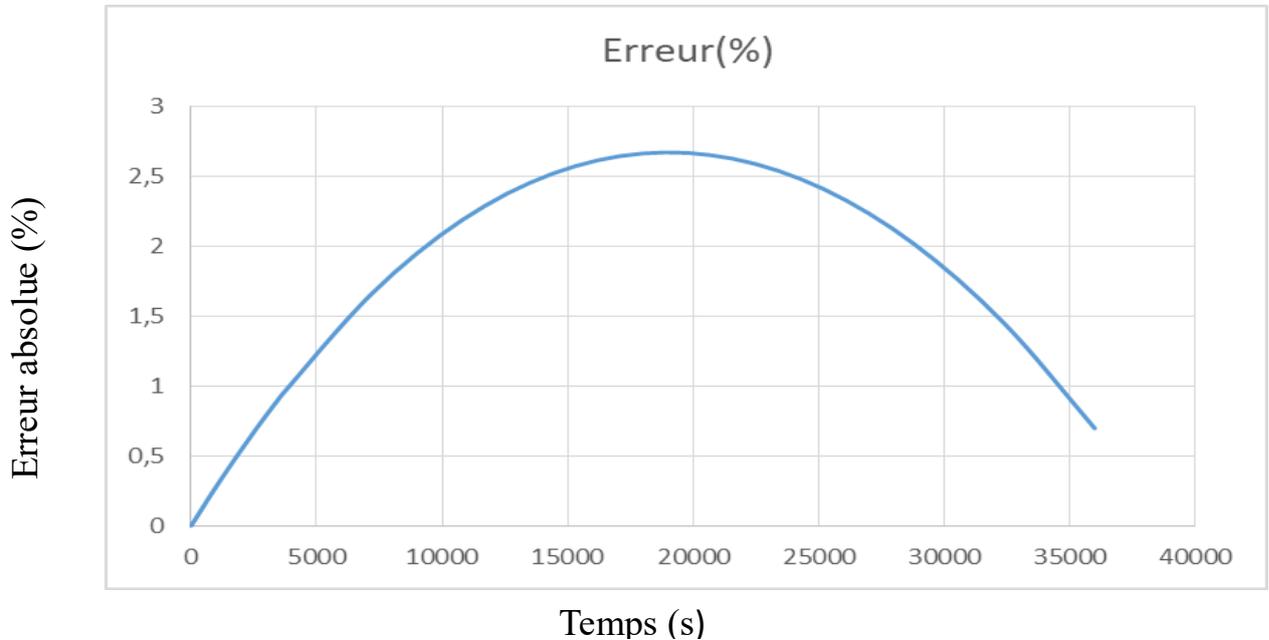


Figure 21 : Erreur absolue du calcul de la température du côté gauche

3.1.2 Champs de la température, de la pression et de la vitesse dans le four solaire

Le champ de température qui est illustré par la figure (23) montre une forme arrondie de la température avec des valeurs plus élevées sur la plaque absorbante, celle-ci étant la source de chaleur. La répartition de la chaleur à l'intérieur du four solaire montre alors une évolution de la température plus importante au fond du modèle que vers le double vitrage. Cette évolution pourrait être expliquée par une accumulation de la chaleur au fond du modèle puisque la plaque est la source de chaleur. Aussi, le four est construit avec des isolants thermiques (copeaux de bois, contreplaqué, bois rouge, etc.) sauf le double vitrage qui est plus conducteur thermique que ces isolants. Ainsi, la chaleur a tendance à s'échapper beaucoup plus par la partie haute que par les parties latérales. Ce qui explique le champ de température en forme de dôme sur la figure (23).

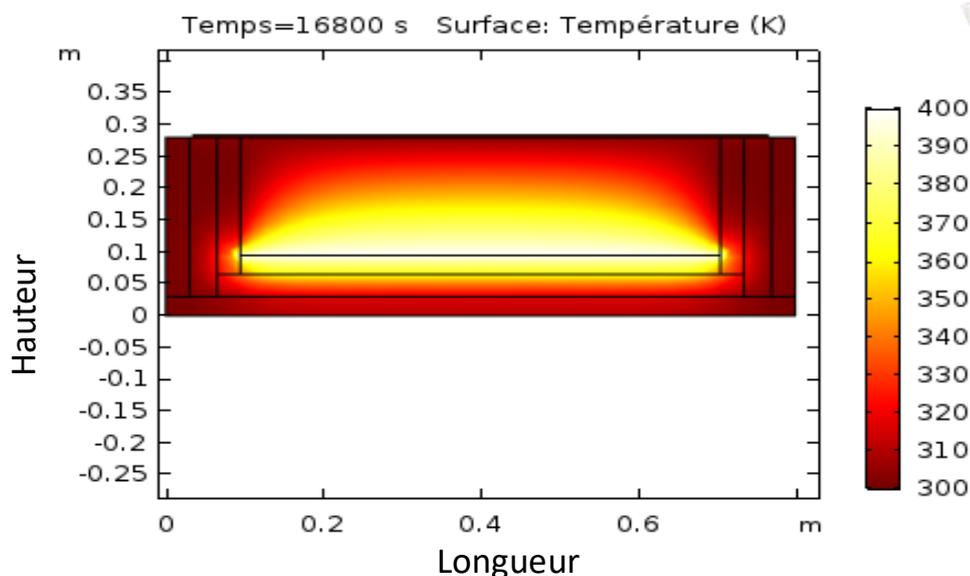


Figure 22: Distribution spatiale de la température dans le four solaire.

La figure (24) montre la répartition de la pression dans le fluide. Elle présente une faible évolution de la pression dans le fluide. Cette évolution peut être expliquée par une absence de turbulence à l'intérieur du fluide, puisqu'on travaille en écoulement laminaire.

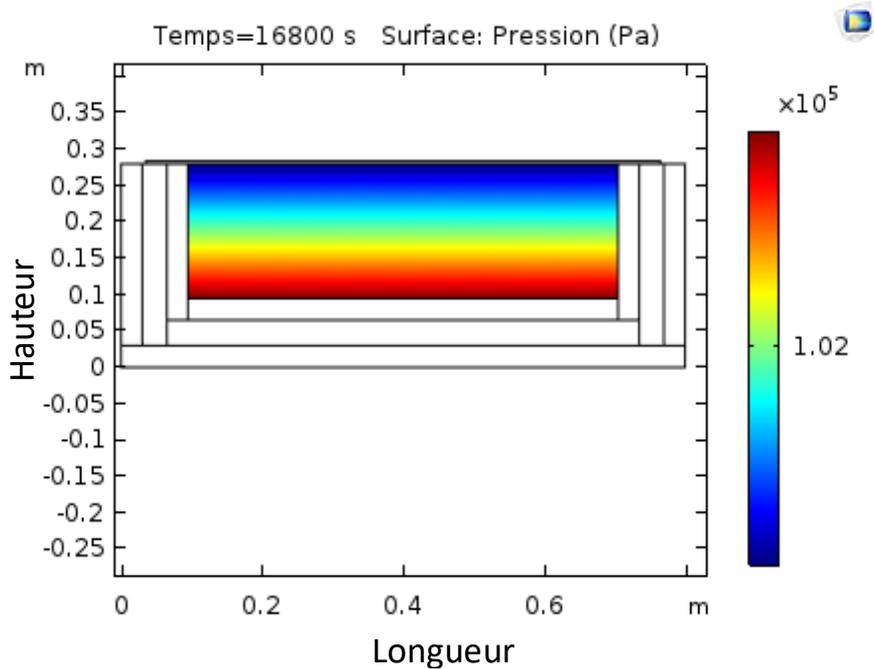


Figure 23 : Champ de pression dans le four solaire

La figure (24) montre le champ de vitesse du fluide dans le modèle. Les variations de celle-ci ne sont pas importantes et on constate que la vitesse est moins élevée à la périphérie qu'au centre du four solaire créant ainsi une sorte de tourbillon.

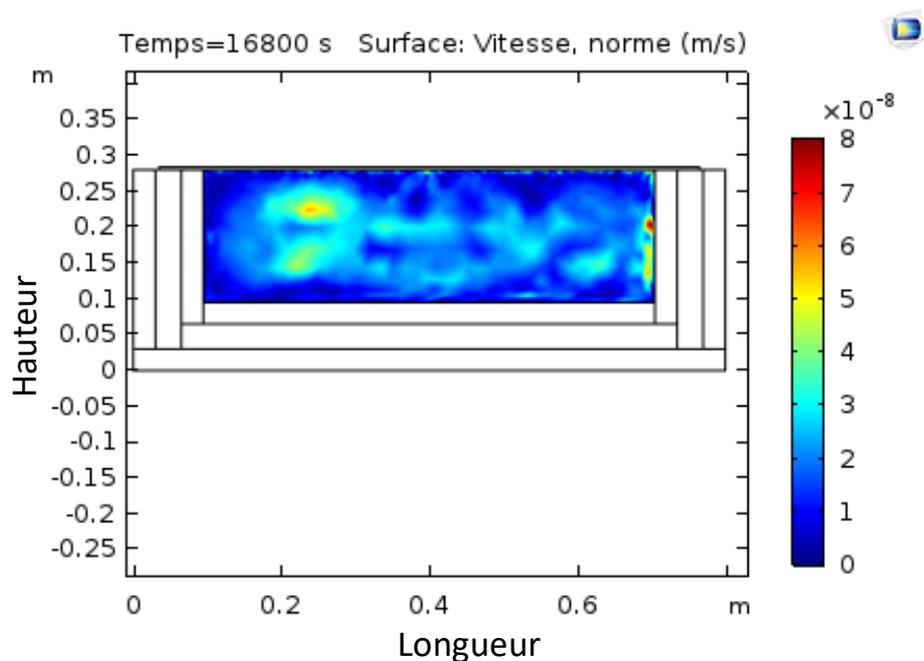


Figure 24 : Champ de vitesse du fluide dans le four solaire.

La distribution spatiale des paramètres physiques du modèle mathématique a montré que la température est le paramètre le plus sensible dans cette étude, la pression et la vitesse du fluide étant quasiment constantes.

3.1.3 Cas pratique : ébullition de l'eau dans une casserole

Dans cette partie, des œufs sont cuits dans une casserole afin de voir l'évolution de la température dans le liquide et pouvoir estimer le temps de cuisson dans ce type de système.

L'utilisation de notre modèle dépend des conditions climatiques et de l'éclairement solaire qui influence l'évolution de la chaleur à l'intérieur du four solaire.

La vitesse du vent, le déplacement des nuages, et la poussière entraînent une diminution de la température donc une augmentation du temps de cuisson.

Pour la cuisson, nous avons besoin d'un matériau qui conduit bien la chaleur et transmet plus rapidement la chaleur vers le contenu de la casserole.

Le paramètre qui caractérise cette propriété physique est la conductivité thermique du matériau. En termes d'exemple pour l'argent, il est égal à $429 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ tandis que pour le cuivre, il est de $387 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ [20]. La casserole absorbe la chaleur et par convection cette chaleur va progressivement se transmettre à la totalité des aliments se trouvant à l'intérieur de la casserole. Néanmoins le choix dépend aussi de la disponibilité des matériaux sur le marché. Dans notre cas, le matériau qui nous est facilement disponible et à moindre coût est le nickel ou l'aluminium. D'où l'utilisation d'une casserole en nickel ou en aluminium. Puisque la conductivité thermique de l'aluminium est plus importante par rapport à celle du nickel ($230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ [21] au lieu $91 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ [22]), notre étude sera basée sur une casserole en aluminium comme la montre la figure (26).



Figure 25 : Casserole en aluminium

La figure (26) montre que les résultats obtenus via la simulation numérique comparés à ceux obtenus via la sonde sont en parfaite adéquation. Les données numériques de la distribution de la température au sein de la casserole en présence de l'eau donnent des valeurs très proches de l'expérience avec une différence de température de $\pm 14^{\circ}\text{C}$. Ce qui est négligeable par rapport aux valeurs de température considérées. Celles-ci dépassent largement les 100°C et cette valeur de la température est idéale pour la cuisson douce de ce type d'aliments. Ceci permet donc de conclure que le modèle développé reproduit avec précision la cuisson des aliments.

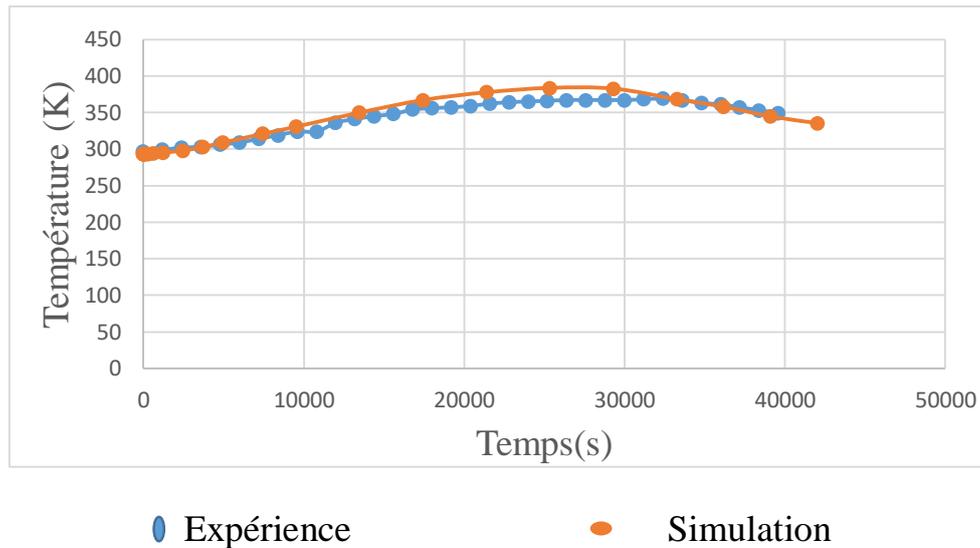


Figure 26 : Evolution temporelle de la température dans une casserole remplie d'eau

L'erreur absolue du calcul de la température au sein de la casserole en présence d'eau donne de très faibles valeurs puisque celles-ci ne dépassent pas les 4,5%. Ce qui permet de conclure que le modèle développé dans ce travail est très précis et simule bien le fonctionnement du four solaire.

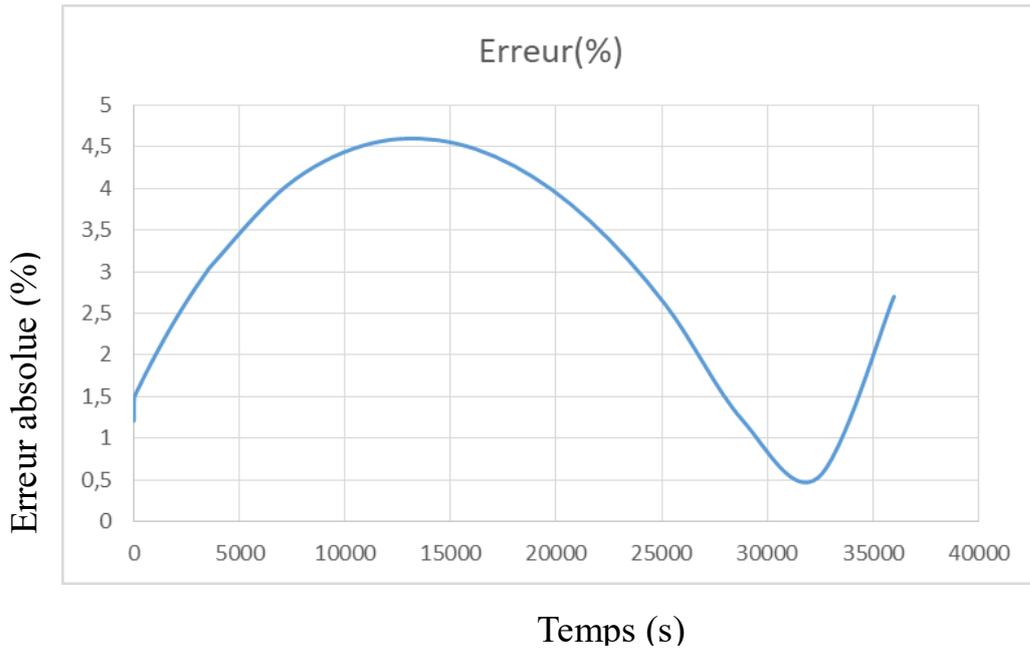


Figure 27: Erreur absolue du calcul de la température à l'intérieur de la casserole dans le four solaire

Quant au champ de température en la présence de la casserole, nous constatons que son comportement prend en compte la présence de cet élément supplémentaire dans le four solaire. En effet, la casserole modifie le champ de température et celle-ci est entourée d'une chaleur de tous les côtés. Sa position au milieu de la plaque absorbante semble être meilleure pour un chauffage efficace que dans les côtés.

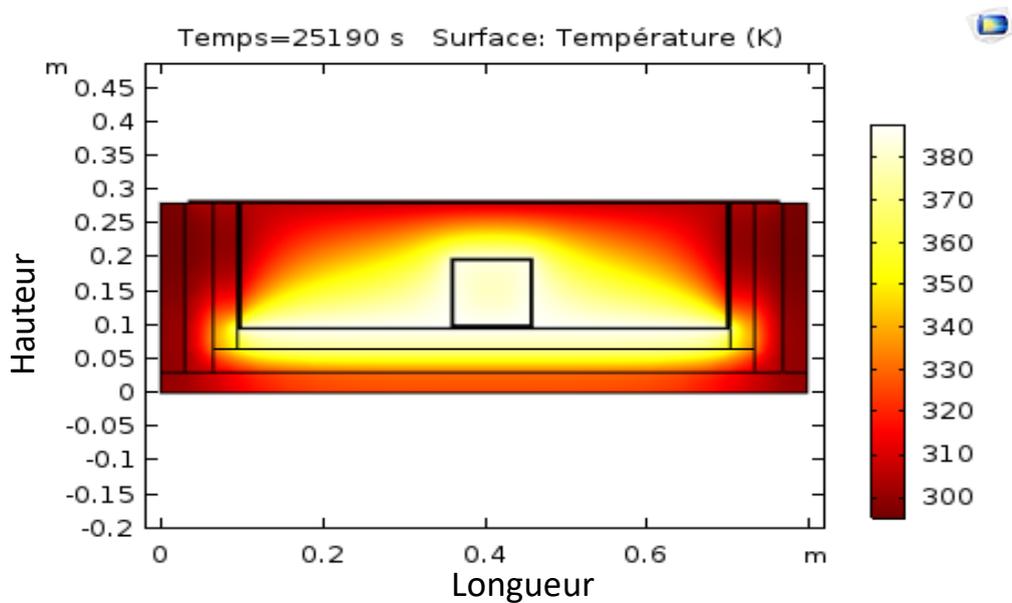


Figure 28 : Champ de température du four solaire en présence de casserole.

La photo représentée par la figure (30) illustre bien des œufs cuits lors d'une campagne expérimentale. Pour cuire ces aliments, le four solaire met moins d'une heure et ce résultat est assez encourageant pour la construction dans l'avenir d'un four solaire beaucoup plus performant.



Figure 29: Cuisson des œufs avec le four solaire

3.1.4 Conclusion

Ce travail a permis de valider les résultats numériques via une comparaison avec ceux obtenus par mesure directe avec des thermocouples placés à différentes positions dans le four solaire. Cette validation s'est avérée exacte puisque l'erreur numérique est acceptable.

Ensuite la distribution spatiale de la température, de la pression et de la vitesse du fluide occupant la partie intérieure du four nous a donné un aperçu sur la répartition non homogène de ces paramètres durant le procédé de chauffage solaire.

Et enfin, un cas pratique a été étudié. Il s'agit de la cuisson d'aliments, plus exactement des œufs, avec une casserole en aluminium. La modélisation de ce procédé avec un élément supplémentaire (casserole) a été validée en comparant la température numérique et celle expérimentale à l'intérieur de la casserole remplie d'eau. Les résultats se sont avérés très prometteurs pour la suite.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de mémoire porte sur la construction d'un modèle numérique permettant de simuler le fonctionnement du four solaire de type boîte sans casserole et avec une casserole remplie d'eau (et avec des aliments).

Pour cela, le premier chapitre fait un rappel du phénomène de chauffage solaire tout en faisant un état de l'art des différents fours solaires. La comparaison de ces différents engins a permis de conclure que, dans le contexte local où nous sommes, le four solaire de type boîte est à notre avis celui le mieux adapté. Il est moins coûteux et plus facile à fabriquer. C'est la raison pour laquelle il a été choisi comme modèle d'étude.

Le second chapitre présente le modèle mathématique qui prend en compte la variation de la température, de la pression et même de la vitesse du fluide se situant dans l'enceinte intérieure du four solaire. Cette partie présente également l'instrumentation spécifique qui a été mise en place pour valider le modèle numérique. Il s'agit de thermocouples placés à différentes positions dans le four (milieu, bords droit et gauche) et qui permettent de connaître l'évolution temporelle de la température dans le four.

Le troisième chapitre a illustré la validation du modèle numérique développé puisque les résultats numériques sont en parfait accord avec ceux de l'expérience. La répartition spatiale des différents paramètres (température, pression et vitesse) permet de constater une répartition non homogène des paramètres physiques dans le four solaire. La cuisson des œufs a été aussi simulée et le modèle, avec cet élément supplémentaire, a été validé avec succès puisque la température à l'intérieur de la casserole est identique à celle expérimentale.

Pour modifier notre modèle, on peut incliner le réflecteur externe d'un angle de 15°C par rapport à la verticale. La face latérale doit être inclinée de 15°C et la face Est de 30°C . Créer une porte au niveau de la face arrière pour faire sortir la marmite après la cuisson. Utiliser des appareils pour mesurer la vitesse du vent, la pression, l'humidité et l'ensoleillement du milieu extérieur. Nous pouvons aussi utiliser la Théorie du moindre carré pour calculer l'écart entre les données numériques et expérimentales.

Ainsi ces résultats, bien que préliminaires, sont très encourageant. En effet, est envisageable de travailler sur un four solaire hybride (solaire et électrique) qui pourrait être utilisé comme séchoir solaire des fruits et légumes. La simulation numérique incluant la colonne, où seront placés les plateaux contenant les aliments à cuire ou sécher, est envisageable dans les futurs travaux.

Bibliographie

- [1] Aoun, Y. (2016). *Conception et développement d'un four solaire pour l'élaboration des oxydes métalliques- caractérisation des oxydes*. Thèse de doctorat publiée à L'université Mohamed Khider-Biskra.
- [2] <https://www.climato-realistes.fr/bulletin-dinformatons-des-climato-realistes-n-92/> (climat Environnement & Energie Le site des climato-réalistes) Consulté le 4 Décembre 2019
- [3] Harmim, A. Boukar, M. et al (2007). *Etude expérimentale d'un cuiseur solaire de type boîte à trois réflecteurs plans et une surface d'ouverture inclinée*. B.P 478, Route de Reggane, Adrar, Algérien.
- [4] http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/attachments/article/742/Four_solaire_principe.pdf (Le four solaire Modèle BISS). Consulté le 7 juillet 2019
- [5] https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_solaire (Four solaire) Consulté le 7 Aout 2019
- [6] <https://dailygeekshow.com/four-solaire-odeillo/> (Exploit technologique français, le four d'Odeillo est une référence mondiale dans le domaine de l'énergie solaire)
Consulté le 2février 2019
- [7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_solaire_d%27Odeillo (Four solaire d'Odeillo)
Consulté le 4 Décembre 2018
- [8] <http://solarcooking.org/francais/minimum-fr.htm> (La Boite-Four Solaire Minimum)
Consulté le 9 Octobre 2019
- [9] http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/attachments/article/826/Four_solaire_gpeR.pdf (Solar Cooker BISS)_Consulté le 9 Octobre 2019
- [10] Ayman, A. Elyazid, A. et al (2014/2015). Thème du projet : *Four Solaire*. Ecole Polytechnique d'Agadir.
- [11]
http://www.burkinadoc.milecole.org/Pieces_Jointes/PDFs/Agriculture_durable/Arbre/Livret_Arbres_Remarquables_de_Casamance.pdf Consulté le 2 Avril 2019
- [12] Ghardaia-Algerie (2012) *.Etude Comparative entre deux types de Cuiseurs Solaires Boîtes en milieu Arides*
- [13] Fekiri, N. (2013). *Transferts de chaleur dans des éléments micro et nano structurés : Simulation et expérimentation par thermographie infrarouge et microscopie*. Rapport de stage

- [14] Grossein, O (2009). *Modélisation et Simulation Numérique des Transferts couplés D'eau, de Chaleur et de Solutés dans le Patrimoine Architecturale en terre, en relation avec sa dégradation*. Thèse de doctorat L'Université Joseph Fourie.
- [15] <https://www.lextronic.fr/sonde-de-temperature-flexible-type-k-10776.html> (Sonde de température flexible (type K)) Consulté le 4 Décembre 2018
- [16] Smith,S.A. Preko,K F et al. *Study of Thermal Properties of Some Selected Tropical Hard Wood Species*. International Journal of Materials Science and Applications. Vol. 5, No. 3, 2016, pp. 143-150. doi: 10.11648/j.ijmsa.20160503.15.
- [17]<https://pdfs.semanticscholar.org/fc70/4903c8196894acfd4618fb48946d6927905b.pdf>.(Thermal Properties of Wood and Wood Products) Consulter le 8 Juillet 2019
- [18]https://www.approche-ecohabitat.org/images/Ecopole/Materiautheque/Isolation/I2_CopeauxBois_v2.pdf (Les copeaux de bois) Consulté le 20 Juin 2019
- [19] Miloud,B. (2016). *Simulation d'un plasma thermique couplé par induction*. Mémoire Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [20] Rocha,S.D . Dechamps,X . (2006-2007). *Elaboration et Construction d'un Four Solaire*. Projet de Deuxième Bachelier Université Libre de Bruxelles.
- [21]<http://fee.ales.free.fr/telechargement/rt2000/regthermiqueRT2000/Th-U-2.pdf> (Conductivité Thermique des matériaux version Décembre 2000) Consulté le 4 Juin 2019
- [22] <https://www.tibtech.com/conductivite.php?lang=fr> FR (Tableau propriétés des aciers inoxydables, métaux et matériaux conducteurs). Consulté le 4 Décembre 2018

