



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
- المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA  
Département Génie des Procédés et Energétique

## MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR D'ETAT

Spécialité : Énergétique et Développement Durable

Présenté par :  
**Bouali Ahmed Sedik**  
**Dahel Sami**

### **Conception et optimisation d'un cuiseur solaire de type boîte pour une cuisson efficace et durable**

Encadré par :  
**DR. Mohamed Said KHALERAS**  
ENSTI Annaba

Membres du jury :

MCB. Sarah CHOUCHE

Président

ENSTI-ANNABA

Pr. Salaheddine AZZOUZ

Examineur

ENSTI-ANNABA

Année 2025

**Résumé :**

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'améliorer l'efficacité thermique d'un cuiseur solaire de type boîte (CBS) pour une cuisson respectueuse de l'environnement et économe en énergie dans les régions bénéficiant d'un ensoleillement abondant. L'équipe de recherche a utilisé la modélisation numérique (ANSYS Fluent) et la méthodologie de la surface de réponse (RSM) pour étudier la modification de paramètres géométriques afin d'améliorer l'absorption solaire et la distribution de la chaleur tout en réduisant les pertes thermiques dues à l'isolation

La partie expérimentale de la recherche a démontré une performance de cuisson plus accélérée. Ces chiffres confirment non seulement notre approche d'optimisation, mais ils correspondent également à une solution pratique et durable pour la cuisson dans les communautés hors réseau. Ils s'inscrivent donc dans le cadre de la transition énergétique durable. La présente étude éclaire la conception des cuiseurs solaires d'un point de vue théorique et pratique.

**Mots-clés:** Cuiseur solaire, optimisation thermique, RSM, ANSYS Fluent, énergie renouvelable, développement durable.

**Abstract :**

The main aim of this research project is to improve the thermal efficiency of a box-type solar cooker (CBS) for environmentally friendly and energy efficient cooking in areas blessed with abundant sunshine. The research team have used numerical modeling (ANSYS Fluent) and Response Surface Methodology (RSM) to study changing parameters for upgrading the solar absorption and heat distribution and at the same time reducing the thermal losses due to insulation.

These figures not only confirm our optimization approach but they also befit a practical, sustainable solution for cooking in off-grid communities. Thus, they become part of the sustainable energy transition. Solar cooker design is being illuminated both theoretically and practically by the present study.

**Keywords:** Solar cooker, thermal optimization, RSM, ANSYS Fluent, renewable energy, sustainable development.

**ملخص:** (CBS) يتمثل الهدف الرئيسي من هذا المشروع البحثي في تحسين الكفاءة الحرارية للطباخ الشمسي الصندوقي

للطهي الصديق للبيئة والموفر للطاقة في المناطق التي تنسم بوفرة أشعة الشمس. استخدم الفريق البحثي النمذجة العددية لتحسين (x, x, x, x) للتحقق من تعديل أربعة معلمات هندسية (RSM) ومنهجية سطح الاستجابة (ANSYS Fluent) ،  $\alpha=0.001^\circ$  ،  $x=x^\circ$  ،  $x=x^\circ$  ،  $x=x^\circ$  ، ومعامل فقدان الحرارة (زيادة 20% عن التصاميم القياسية)، وتوزع الحرارة مع تقليل الفقد الحراري بسبب العزل. نتج عن أفضل مزيج تدفق حراري ممتص قدره 734.77 واط/م<sup>2</sup> (زيادة 20% عن التصاميم القياسية)، وأظهر الجزء التجريبي من البحث أداء طهي أكثر سرعة (وصلت درجة حرارة الأرز إلى x درجة مئوية مقارنة بـ x درجة مئوية في النماذج القياسية في x دقيقة). لا تؤكد هذه الأرقام نهج التحسين الذي اتبعناه فحسب، بل تمثل أيضًا حلاً عملياً ومستداماً للطهي في المجتمعات خارج الشبكة. وبالتالي فهي جزء من التحول في مجال الطاقة المستدامة. تسلط هذه الدراسة الضوء على تصميم أجهزة الطهي بالطاقة الشمسية من منظور نظري وعملي على حد سواء

**الكلمات المفتاحية:** جهاز الطهي بالطاقة الشمسية، التحسين الحراري،، الطاقة المتجددة، التنمية المستدامة

## Remerciements

Nous remercions Allah, notre Créateur, de nous avoir donné la force d'accomplir ce projet de fin d'études.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre superviseur, le **Dr. KAHALERAS Mohamed Said**, pour son soutien et sa compréhension inébranlables tout au long de ces trois mois. Ses encouragements et sa motivation resteront gravés dans notre mémoire, ainsi que le temps et la patience qu'il nous a consacrés, en particulier lors des moments les plus difficiles du projet.

Nous remercions tous les orienteurs, ainsi que toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont apporté leur aide et ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier nos parents pour leurs sacrifices, leur soutien et l'amour qu'ils nous ont témoignés tout au long de notre cursus scolaire.

Un grand merci également à nos frères et sœurs. Leur soutien, leurs encouragements précieux et leur présence ont toujours été une source de courage et de force. Que Dieu les protège et les maintienne à nos côtés.

À toutes ces personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de ce travail, nous exprimons notre reconnaissance et notre gratitude sincères.

## Financement et achats de matériel

Il est important de souligner que l'achat de l'ensemble du matériel ainsi que la construction des deux cuiseurs solaires ont été entièrement financée par **Dr. KAHALERAS Mohamed Said** sur ses fonds personnels.

## ***Dédicace***

*Avec tout mon respect et mon affection, je dédie ce travail à ma famille, à ma mère et mon père, à mon frère et ma sœur, ainsi qu'à celle qui fait battre mon cœur, **LALEH RAHIMA**.*

*pour leur soutien indéfectible et pour avoir toujours cru en moi. Leurs encouragements ont été mon refuge et ma motivation durant tout le parcours académique. Pour leur patience illimitée et leur aide.*

*A tous mes amis et particulier : **ABD EL LATIF , ABD ERRAHIM , ABD RAHMANE , SAMI , HAKIM , AKREAM , RIDA , CHEIKH EL ARABI** mes amis de la willaya de Ain defla , pour son aide précieuse, ainsi qu'à tous ceux qui ont été là pour moi dans les bons mais aussi dans les mauvais moments*

*A ma classe 5ème EDD Meilleure classe pour les bons souvenirs que j'ai partagés avec vous .*

*Je ne peux citer ici toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidé et encouragé mais je les remercie vivement.*

## ***Dédicace***

*Avec tout mon respect et mon affection je dédie ce travail à ma famille, à ma mère, à mon père ainsi qu'à mon frère..*

*pour tout le bien qu'ils n'ont cessé de me prodiguer depuis ma naissance et pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis à faire pour moi.*

*A tous mes amis et particulier : **AHMED , HAKIM , FARAGE , MINOU***

*pour son aide précieuse, ainsi qu'à tous ceux qui ont été là pour moi dans les bons mais aussi dans les mauvais moments,*

*A ma classe 5ème EDD Meilleure classe pour les bons souvenirs que j'ai partagés avec vous.*

*Je ne peux citer ici toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidé et encouragé mais je les remercie vivement.*

## Liste des abréviations :

$\tau$	intervalle de temps pour l'augmentation de la température de l'eau de $T_{w1}$ à $T_{w2}$
$c_w$	chaleur spécifique de l'eau
$F_1$	premier chiffre de mérite
$F_2$	deuxième figure de mérite
$\bar{H}$	insolation moyenne pendant l'intervalle de temps pour l'augmentation de la température de l'eau
$m_w$	masse d'eau
$P$	la puissance de cuisson moyenne du cuiseur
$U_L$	coefficient global de perte de chaleur en régime permanent
$R_w$	coefficient de non-uniformité thermique
$T_a$	température de l'air ambiant
$T_P$	température de stagnation de la plaque absorbante
$S_{abs}$	la surface de la plaque absorber
$S_{glass}$	la surface de la couverture en verre
$T_{abs}$	température de la plaque absorbante
$T_{wi}$	la température de la cellule de grille <i>i</i>
$\overline{T_{w_i}}$	la température moyenne de la paroi
$T_{amb}$	Température ambiante
$R_a$	Nombre de Rayleigh

## Liste des figures :

Figure 3.1 :Représentation schématique de la structure du CBS et de ses principaux composants. ....	16
Figure 3.2 :Représentation schématique en 2D des quatre angles géométrique ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ et $\theta$ ) définissant la structure du box solaire. ....	17
Figure 3.3 :Maillage généré pour le modèle physique dans ANSYS Meshing qui représente le domaine des fluides à l'intérieur du cuiseur. ....	19
Figure 3.4 :Test d'indépendance de du maillage de UL pour une large gamme d'éléments de maillage. ....	20
Figure 3.5 : Superposition des résultats de contours de température ANSYS Fluent : présente travail (a) vs. Littérature (b). ....	20
Figure 3.6 :. Superposition des résultats de contour de flux de chaleur solaire ANSYS Fluent : présente travail (a) vs. Littérature (b). ....	21
Figure 3.7: Plan Box–Behnken design (BBD) .....	22
Figure 3.8 :Evaluation de la normalité des résidus du modèle. ....	24
Figure 3.9 : Graphes de validation du modèle statistique (Predicted vs. Actual).....	25
Figure 4.1 : Contours de température et de lignes de courant. ....	27
Figure 4.2: Interaction entre les paramètres angulaires .....	29
Figure 4.3 :Comparaison entre le cuiseur solaire standard et optimisé. ....	31
Figure 4.4 :Comparaison entre le cuiseur solaire standard et optimisé. ....	31
Figure 4.5 :Comparaison entre la température de riz de cuiseur solaire standard et optimisé. ....	32
Figure 4.6 :l'évolution de la température de la plaque absorbante dans les deux cuiseurs .....	33

## Liste des tableaux :

Tableau 3 .1 : Valeurs codées et réelles des différentes variables d'entrée. ....	17
Tableau 4.1Résultats de la prédiction de la géométrie optimale du CBS.....	30
Tableau 4.2 : Gradient de température ( $\Delta T$ ) entre le centre et l'extrémité de la plaque absorbante pour les cuiseurs solaires standard et optimisé .....	32

# SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b> .....	10
<b>Chapitre 1 : motivation et problématique sur le thème</b> .....	12
<b>1.1 Motivation</b> .....	12
<b>1.2 Problématique</b> .....	12
<b>Chapitre 02 : Etat de l’art de recherche bibliographique</b> .....	14
<b>Chapitre 3 :Modélisation et Simulation Numérique</b> .....	16
<b>3.1 Géométrie et propriétés des matériaux</b> .....	16
<b>3.2 Modélisation numérique</b> .....	17
<b>3.3 Conditions aux limites</b> .....	18
<b>3.4 Non dimensionnement</b> .....	18
<b>3.5 Modèle de maillage et étude de l’indépendance de la grille</b> .....	19
<b>3.6 Validation du modèle</b> .....	20
<b>3.7 Optimisation des paramètres opératoires par la méthode RSM (Box–Behnken)</b> .....	21
<b>Chapitre 4 :Essai Expérimentale et Résultats discussion</b> .....	25
<b>4.1 Effets d’interaction entre les paramètres angulaires</b> .....	28
<b>4.2 Prédiction de la géométrie optimale</b> .....	30
<b>4.3 Réalisation expérimentale des cuiseurs solaires</b> .....	30
<b>4.4 Essai expérimental de cuisson</b> .....	31
<b>Conclusion</b> .....	34
<b>Références bibliographiques</b> .....	35

## Introduction Générale :

Face à la montée constante de la demande d'énergie dans le monde et aux problèmes liés à la forte consommation des énergies fossiles, il devient stratégique de se tourner vers des énergies renouvelables. L'énergie solaire est une énergie renouvelable particulièrement intéressante, car elle est abondante, gratuite, propre et inépuisable [1]. Elle peut répondre à des besoins comme la cuisson des aliments, notamment dans des pays où les habitants ne peuvent pas s'offrir du gaz ou de l'électricité. Pour ces dernières, le four solaire peut constituer une bonne alternative. En utilisant le soleil comme source d'énergie, il permet de se passer des énergies polluantes et de consommables coûteux, et ainsi de gagner en autonomie [2,3].

Au niveau de la cuisson, le four en forme de boîte solaire a l'avantage d'être simple à fabriquer, d'être peu onéreux et d'être facile à mettre en place. Il utilise un effet de serre puisque une vitre permet de récupérer la chaleur dans une boîte isolée, et en utilisant l'intérieur de la boîte en noir, des réflecteurs mobiles et inclinables, permettant de réfléchir les rayons du soleil dans la boîte, il est possible d'améliorer la montée en température à l'intérieur du four[4]. Ces fours ont déjà été étudiés dans la littérature. Ainsi on a pu voir dans la littérature qu'un four local pouvait atteindre une température de 140 °C [5] ; on a aussi vu qu'on pouvait isoler le four avec de la laine de roche pour obtenir de meilleures performances [6] ; qu'on optimisait l'inclinaison du réflecteur pour obtenir l'intensité du soleil la plus importante possible [7] ; et que des simulations à l'aide du logiciel COMSOL[ 8] positionné sur  $(x = 0)$  avaient montré que la modélisation du four solaire était représentative, aussi bien pour la température de montée que pour la vitesse à laquelle la température augmentait.

Dans ce projet de fin d'étude, il s'agit de concevoir un prototype de four solaire performant, adapté à la région d'Afrique du Nord où le soleil est intense tout au long de l'année. A travers cette initiative, nous souhaitons accompagner la transition énergétique en proposant une solution durable, écologique, économique.

Le premier chapitre présente les objectifs de cette étude et la problématique, ainsi qu'une introduction générale sur les fours solaire de type boîte.

Le deuxième chapitre contient une synthèse bibliographique sur les fours solaire de type a boîte, Et les avantages de ces applications dans le coté environnemental et énergétique.

Le troisième chapitre présente la méthodologie adoptée pour l'optimisation d'un cuiseur solaire de type boîte, en vue d'améliorer ses performances thermiques.

Le quatrième chapitre présente l'analyse des interactions influençant les performances thermiques d'un cuiseur solaire à boîte.



# **Chapitre 1 : motivation et problématique sur le thème**

## **1.1 Motivation :**

Nous avons choisi ce sujet par intérêt pour les énergies renouvelables et pour trouver à notre tour des alternatives plus respectueuses de l'environnement aux modes de cuisson conventionnels. En effet, après nous être informés sur le sujet de consommation d'énergie et des rejets polluants dans les pays en développement, nous avons voulu nous approfondir sur les fours solaires de type four à boîte. Nous avons été curieux de savoir s'il était encore possible d'innover pour capter la chaleur à l'intérieur de ces fours, avec de nouveaux matériaux ou de nouvelles façons de construire. Nous pensons que ce projet est intéressant, motivant et porteur d'avenir. En effet, les fours solaires de type four à boîte sont déjà une alternative écologique aux besoins de cuisson dans de nombreux pays à fort ensoleillement mais leur rendement thermique peut encore être amélioré. De ce fait, notre projet s'inscrit dans le sens de l'amélioration et de l'accessibilité de ces fours en les aidant à mieux capter la chaleur à l'intérieur d'eux. Nous avons aussi été attirés par ce sujet car nous le pensons d'actualité face aux enjeux du développement durable et porteur d'innovations.

Pour conclure, nous pensons que ce projet nous apportera de fortes expériences en recherche et développement, ainsi que de fortes compétences en ingénierie thermique et en technologies solaires, des compétences indispensables pour nous en tant qu'ingénieur de demain en innovation énergétique écoresponsable !

## **1.2 Problématique :**

Si les fours solaires de type boîte sont des appareils simples et écoresponsables pour cuisiner et qui sont très économiques, on observe que ses caractéristiques thermiques laissent encore à désirer. Le four est entièrement constitué par de l'énergie solaire et sa performance dépend donc, de là où il est utilisé des conditions climatiques et de l'ensoleillement au moment de la cuisson. Ensuite, il existe des critères techniques qu'il faudra prendre en compte comme l'orientation du four, sa qualité d'isolation et l'efficacité des réflecteurs utilisés. Si le four est utilisé dans une zone peu ensoleillée et quelque temps nuageux, l'utilisateur sentira rapidement une perte de performance, ce qui rendra vite l'appareil peu fiable, voire inutilisable. La performance inconstante limite l'intérêt pour le four comme solution universelle notamment dans les régions du monde où les gens ont peu de ressources, elles doivent donc être fortes et irréalistes à ces gens.

Face à ces différents problèmes, il devient urgent de chercher à améliorer la conception des fours solaires. Il s'agit de repenser certains aspects de l'appareil pour qu'il puisse mieux absorber la chaleur et la retenir le plus longtemps possible dans le four et tout ça en gardant le prix de fabrication le plus bas possible. Cela peut se faire par l'utilisation de meilleurs isolants,

par les réflecteurs qui peuvent s'orienter, par le polissage ou la peinture noire de la surface absorbante à l'intérieur du four, par la forme ou la taille du four. Toutes ces idées sont bonnes à prendre. On pourrait ainsi espérer rendre le four plus performant même lorsque le temps n'est pas ensoleillé. Le but est de garder la performance thermique très élevée, fiable tout en gardant le prix le plus bas possible pour finalement offrir une solution pérenne aux populations qui habitent dans des régions où les énergies fossiles sont difficiles à obtenir.

## Chapitre 02 : Etat de l'art de recherche bibliographique

**GHARBI M., BENGHANEM M. et DRAOUI B. (2011)** ont réalisé un travail expérimental sur un four solaire de type boîte, réalisé artisanalement pour offrir une solution de cuisson solaire pour des foyers en milieu rural, sans accès à l'électricité. L'originalité de ce four est qu'il est fabriqué avec des matériaux artisanaux comme la caisse en bois, une vitre plate et équipé d'un réflecteur orientable pour augmenter l'ensoleillement du four. Le four permet donc d'atteindre jusqu'à 140 °C ce qui est suffisant pour la cuisson des aliments quotidiens comme le riz, des gâteaux, etc. L'étude porte aussi sur la performance du four en fonction des saisons, ce qui permet d'avoir une idée de sa capacité d'adaptation aux conditions réelles. C'est un bel exemple de technologie simple et efficace pour le développement des territoires ruraux.[5]

**MAMI B., MILI F. and HAMOU A. (2015)** ont travaillé sur l'amélioration du rendement thermique des cuiseurs solaires en développant un four plus efficace. Pour cela, ils ont isolé l'intérieur du four par une couche de laine de roche et ont revêtu de noir mat l'intérieur du four, de manière à améliorer son absorption et sa rétention de la chaleur. Les modélisations numériques réalisées et validées par la simulation montrent qu'il est possible d'atteindre une température de 130 °C sous un bon ensoleillement. Leur travail a montré qu'en améliorant simplement certains matériaux et l'isolation du four, il est possible d'augmenter fortement les performances du four solaire, tout en gardant des coûts de fabrication faibles. La méthode de conception qu'ils proposent est particulièrement intéressante dans des contextes où il est important d'économiser l'énergie[6].

**MEBARKIA A., ZERROUKI H. et BENOURET L. (2020)** ont étudié la conception d'un four solaire simple et peu coûteux, utilisable notamment dans des régions à fort ensoleillement. Le point central de ce travail est la simplicité de la fabrication du four, fabriqué avec un plan de réflecteur et une caisse de cuisson vitrée conçue pour conserver la chaleur de manière optimale. L'une des caractéristiques principales de leur étude est la valorisation de l'angle du réflecteur qui permet de concentrer le rayonnement solaire à l'intérieur du four. Grâce à une étude expérimentale, il a été démontré que le four était capable de fournir des températures de cuisson domestique. La technologie peut ainsi être diffusée pour des raisons de développement durable, car le four proposé est facilement fabriqué à partir de matériaux de récupération et de pièces de matériel hors d'usage et s'adresse à des populations à faibles ressources comme par exemple, dans des zones désertiques d'Afrique et du Maghreb, où le soleil est un élément moteur pour le développement durable et où les populations vivent souvent dans la précarité[7].

**AI-NEHARI H.A., Mohammed M.A., et al. (2021)** ont conçu un four solaire à inclinaison variable, destiné à satisfaire les besoins de cuisson d'un ménage moyen au Yémen, un pays touché par une crise énergétique majeure. Le four, à faible coût (74 \$), comprend un compartiment de cuisson à double vitrage, quatre réflecteurs extérieurs en aluminium et un

système manuel de suivi de la course du soleil à l'aide de l'ombre permettant de positionner au mieux le four à parabole face aux rayons solaires. Une attention a été portée à sa conception de telle sorte qu'il puisse être reproduit localement simplement et à moindre coût à partir de matériaux locaux tels que le bois, l'aluminium noir et une isolation avec deux couches d'air. Les caractéristiques thermiques déterminées par des essais ont montré que le four est capable d'atteindre une température de stagnation de 172,75 °C et une puissance de cuisson de 63,53 W. Deux paramètres normalisés ( $F1 = 0,1354 \text{ Cm}^2/\text{W}$  et  $F2 = 0,4934$ ) confirment l'utilisation du four. Par ailleurs, une modélisation numérique du four en 3D a été réalisée avec le logiciel ANSYS-FLUENT afin de comparer et améliorer le fonctionnement du four. Elle a trouvé une très forte correspondance avec les résultats expérimentaux. Cette invention à très bas coût s'inscrit dans une logique de transition énergétique durable, de souveraineté énergétique et de transfert technologique pour les pays émergents [1].

En recouvrant la plaque absorbante d'un revêtement Ni-Co par électrodéposition, **Chitharaj R., Perumal H., Almeshaal M. et Manoj Kumar P. (2025)** ont cherché à améliorer les propriétés thermiques et de résistance tout en réduisant l'impact environnemental du revêtement noir de chrome habituel. Les expériences menées avec ou sans réflecteur pour diverses inclinaisons du collecteur et du réflecteur et différents débits d'eau montrent une moyenne de performances thermiques de 50,9 % sans réflecteur dépassée par 59,0 % avec réflecteur. Une modélisation par régression quadratique de justesse ( $R^2 = 0,9941$ ) permet de mettre en évidence les meilleurs paramètres à savoir un débit de 1,32 L/min, une inclinaison du collecteur de 46,91° et une inclinaison du réflecteur de 42,34° pour un rendement prédit de 79,2 %. Ce travail montre qu'un revêtement Ni-Co combiné à un réflecteur permet d'augmenter l'absorption et la transmission thermique de capteurs solaires tout en proposant un revêtement plus durable et moins polluant que celui habituellement utilisé à base de chrome [9].

## Chapitre 3 : Modélisation et Simulation Numérique

Ce chapitre présente la méthodologie adoptée pour l'optimisation géométrique d'un cuiseur solaire de type boîte, en vue d'améliorer ses performances thermiques. L'étude analyse l'effet de quatre paramètres géométriques sur la captation solaire et la répartition de la chaleur dans la cavité. L'objectif est de réduire les pertes thermiques vers l'extérieur, améliorer l'uniformité de température de la plaque absorbante et augmenter la densité thermique interne. Pour ce faire, un plan d'expériences Box-Behnken a été mis en place, afin d'évaluer les effets individuels et les interactions entre facteurs. En complément, un modèle basé sur l'intelligence artificielle a été utilisé pour prédire les réponses et affiner le choix de la géométrie optimale. La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent, permettant de modéliser les transferts thermiques et les écoulements d'air à l'intérieur du cuiseur solaire à boîte (CBS).

### 3.1 Géométrie et propriétés des matériaux :

**Figure 3.1** présente la géométrie tridimensionnelle (3D) représentative d'un cuiseur solaire de type boîte utilisé. présente la géométrie tridimensionnelle (3D) représentative d'un cuiseur solaire de type boîte utilisé. Le dispositif est constitué d'une enceinte externe en bois, d'une chambre de cuisson interne en aluminium et d'un isolant thermique en laine de verre de 1,24 cm d'épaisseur tapissant les parois. La partie supérieure est fermée par un couvercle en verre transparent, permettant la transmission du rayonnement solaire tout en limitant les pertes thermiques. présente la géométrie tridimensionnelle (3D) représentative d'un cuiseur solaire de type boîte utilisé. présente la géométrie tridimensionnelle (3D) représentative d'un cuiseur solaire de type boîte utilisé



*Figure 3.1 : Représentation schématique de la structure du CBS et de ses principaux composants.*

La conception des différents modèles repose sur des hypothèses liées à la captation solaire et à la dynamique des fluides internes (figure 3.2) :

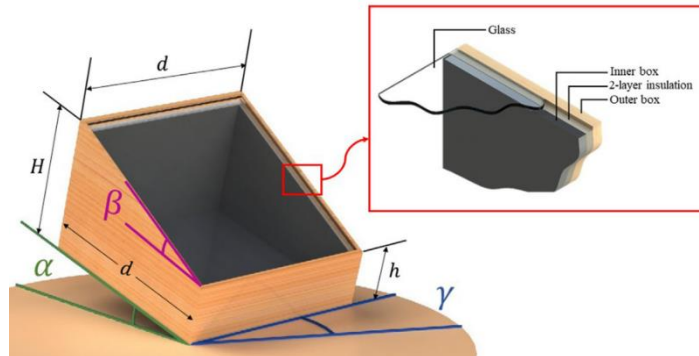


Figure 3.2 : Représentation schématique en 2D des quatre angles géométrique définissant la structure du box solaire.

Dans le cadre de cette étude d'optimisation, plusieurs configurations distinctes ont été définies et chaque cas correspond à une combinaison spécifique des quatre angles, Dans le cadre de cette étude d'optimisation, plusieurs configurations distinctes ont été définies et chaque cas correspond à une combinaison spécifique des quatre angles

Tableau 3 .1 : Valeurs codées et réelles des différentes variables d'entrée.

Facteur/Nom	Type de variable	Codé		Valeur réelle		
		Faible	Élevé	Faible	Moyenne	Moyenne
A	Numérique	-1	1	0	1	2
B	Numérique	-1	1	0	1	2
C	Numérique	-1	1	0	1	2
D	Numérique	-1	1	0	1	2

### 3.2 Modélisation numérique :

Pour prédire l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur à l'intérieur du cuiseur solaire à couvercle, ont été résolues en régime permanent les équations de conservation de la masse (Eq.1), de la quantité de mouvement (Eq.2) et de l'énergie (Eq.3):

Pour prédire l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur à l'intérieur du cuiseur solaire à couvercle, ont été résolues en régime permanent les équations de conservation de la masse (Eq.1), de la quantité de mouvement (Eq.2) et de l'énergie (Eq.3):

$$F_1 = \frac{T_p - T_a}{H} \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{F_1 m_w c_w}{A \tau} \ln \left[ \frac{1 - \frac{T_{w1} - T_a}{F_1 H}}{1 - \frac{T_{w2} - T_a}{F_1 H}} \right] \quad (2)$$

$$P = \frac{m_w c_w (T_{w2} - T_{w1})}{\tau} \quad (3)$$

### 3.3 Conditions aux limites :

Le BSC a de multiples conditions aux limites. Afin d'empêcher les pertes de chaleur, toutes les surfaces extérieures telles que les côtés et le fond ont été considérées comme adiabatiques, ce qui représente une isolation parfaite. Le BSC a de multiples conditions aux limites. Afin d'empêcher les pertes de chaleur, toutes les surfaces extérieures telles que les côtés et le fond ont été considérées comme adiabatiques, ce qui représente une isolation parfaite.

Les valeurs suivantes ont été utilisées pour les conditions limites :

Boîte intérieure :  $\varepsilon_{absorptivity}$  et  $q = 0$ .

Couvercle en verre :  $\varepsilon_{absorptivity}$  et  $\varepsilon_{transmissivity}$  et  $h_{ext}$

Température ambiante = 310 K.

### 3.4 Non dimensionnement :

Le coefficient global de perte de chaleur en régime permanent est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$U_L = \left[ \frac{1}{h_{int}} + \left( \frac{S_{abs}}{S_{glass}} \right) \left( \frac{1}{h_{ext}} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

Où  $S_{glass}$  est la surface de la couverture en verre ( $m^2$ ),  $S_{abs}$  est la surface de la plaque absorber ( $m^2$ ).

Le coefficient global de perte de chaleur en régime permanent est calculé à l'aide de la formule suivante, comme défini dans l'Eq. (9).

$$R_w = \sqrt{\sum \left( \frac{T_{w,i} - \bar{T}_{w,i}}{\bar{T}_{w,i}} \right)^2} \quad (9)$$

Le coefficient global de perte de chaleur en régime permanent est calculé à l'aide de la formule suivante.

Dans le cadre de l'évaluation normalisée des performances thermiques d'un cuiseur solaire à boîte (SBC), deux figures de mérite, notées F1 et F2, sont généralement utilisées.

La figure de mérite F1 permet de quantifier l'efficacité optique globale du système. Elle est calculée à partir de l'élévation de température de la plaque absorbante lors d'un test à vide, rapportée au flux solaire incident. Elle reflète ainsi la capacité du cuiseur à capter et convertir le rayonnement solaire en chaleur utile. Une valeur élevée de F1 indique une bonne absorption de l'énergie solaire et un rendement optique performant :

$$F_1 = \frac{T_{abs} - T_{amb}}{H} \quad (10)$$

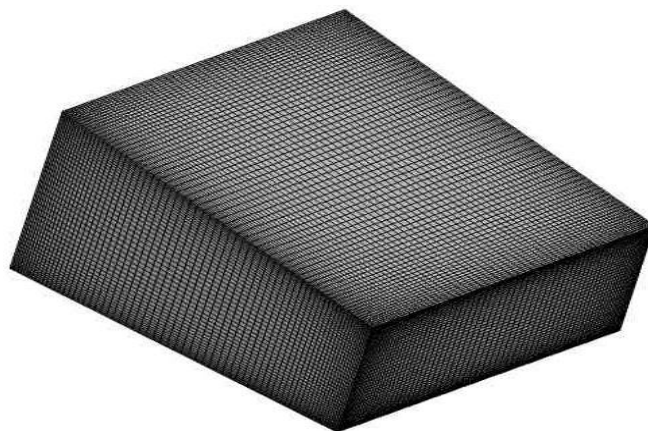
La figure de mérite F2, quant à elle, évalue la performance d'isolation thermique du cuiseur. Elle est déterminée à partir de la vitesse de refroidissement du système après interruption de l'exposition au soleil. Elle caractérise donc les pertes thermiques du dispositif. Une valeur élevée de F2 témoigne d'un bon confinement de la chaleur et d'une faible dissipation thermique :

$$F_2 = \frac{\left[1 - \frac{(T_{w1} - T_a)}{F_1 H}\right]}{\left[1 - \frac{(T_{w2} - T_a)}{F_1 H}\right]} \quad (11)$$

Ces deux indicateurs sont complémentaires et doivent atteindre des seuils spécifiques pour garantir une conception efficace du cuiseur selon les standards internationaux.

### **3.5 Modèle de maillage et étude de l'indépendance de la grille :**

Pour garantir des résultats de simulation fiables, une étude d'indépendance du maillage a été réalisée. Un maillage structuré a été créé dans ANSYS Meshing, avec un raffinement de la couche limite appliqué en utilisant un facteur de biais de 10 pour mieux capturer les gradients près de la paroi Fig. 3.3



*Figure 3.3 :Maillage généré pour le modèle physique dans ANSYS Meshing qui représente le domaine des fluides à l'intérieur du cuiseur.*

Une étude d'indépendance du maillage a été menée en utilisant des grilles progressivement raffinées. Une étude d'indépendance du maillage a été menée en utilisant des grilles progressivement raffinées. Une étude d'indépendance du maillage a été menée en utilisant des grilles progressivement raffinées. Une étude d'indépendance du maillage a été menée en utilisant des grilles progressivement raffinées.

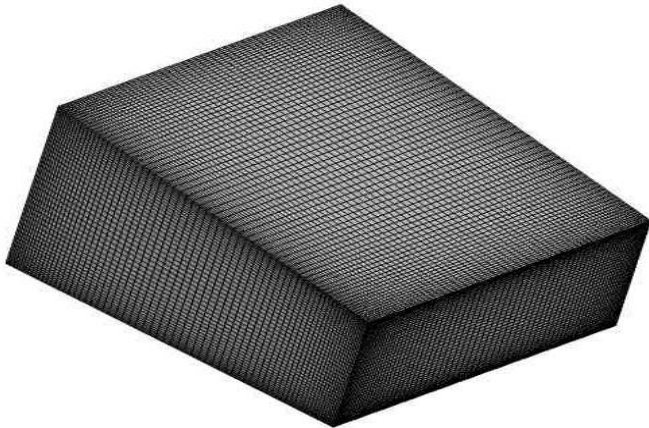


Figure 3.4 : Test d'indépendance de du maillage de UL pour une large gamme d'éléments de maillage.

**Validation du modèle :**

Pour valider le modèle développé, les températures en son centre de la plaque de l'absorbeur ont été mises en parallèle avec les valeurs recueillies expérimentalement dans A .al [1]. Comme on peut l'observer sur la fig. 3.5, on constate que les résultats numériques sont en bon accord avec les relevés expérimentaux avec une erreur relative maximale inférieure à 1 % ce qui valide l'approche de simulation adoptée.

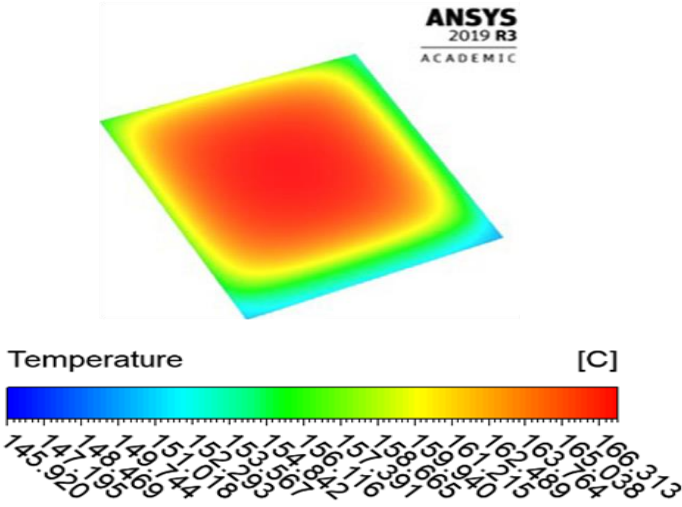


Figure 3.5 : Superposition des résultats de contours de température ANSYS Fluent : présente travail (a) vs. Littérature (b)[1] .

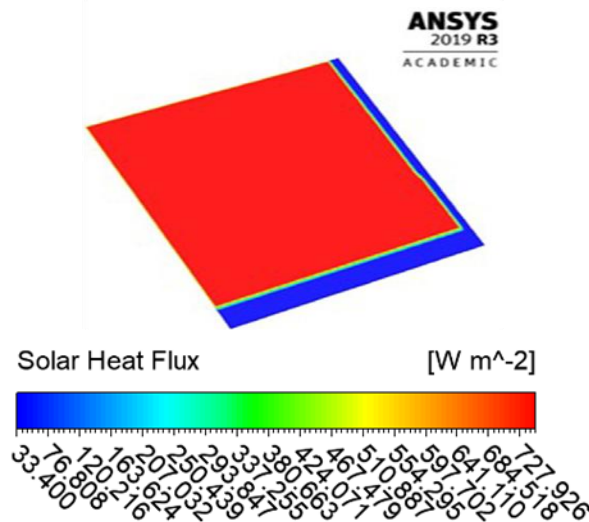


Figure 3.6 : Superposition des résultats de contour de flux de chaleur solaire ANSYS Fluent : présente travail (a) vs. Littérature (b)[1].

### 3.7 Optimisation des paramètres opératoires par la méthode RSM (Box–Behnken) :

Afin de compléter l'analyse numérique et d'identifier la configuration optimale du cuiseur solaire, une optimisation a été réalisée à l'aide de la Méthode des Surfaces de Réponse (RSM). Cette approche statistique permet de modéliser les réponses thermiques (telles que le flux absorbé ou les pertes thermiques) en fonction de plusieurs facteurs. Afin de compléter l'analyse numérique et d'identifier la configuration optimale du cuiseur solaire, une optimisation a été réalisée à l'aide de la Méthode des Surfaces de Réponse (RSM). Cette approche statistique permet de modéliser les réponses thermiques (telles que le flux absorbé ou les pertes thermiques) en fonction de plusieurs facteurs.

Cette méthode permet de construire un modèle prédictif basé sur des équations quadratiques, d'évaluer la significativité statistique des effets via l'analyse ANOVA, et de proposer une géométrie optimale assurant une performance thermique élevée avec une forte désirabilité.

Elle s'appuie sur des approximations polynomiales d'ordre inférieur, typiquement des équations de second ordre, pour explorer l'influence des paramètres de conception et de leurs interactions. Un modèle général de second ordre est décrit comme suit:

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ii} x_i^2 + \sum a_{ij} x_i x_j \quad (12)$$

où  $a_0$ ,  $a_i$ ,  $a_{ii}$  et  $a_{ij}$  indiquent le coefficient de régression de l'ordonnée à l'origine, l'effet linéaire de  $x_i$ , l'effet quadratique de  $x_i$  et l'effet d'interaction linéaire entre  $x_i$  et  $x_j$ , respectivement, et  $\epsilon$  indique l'erreur résiduelle entre la valeur réelle et la valeur approximative.

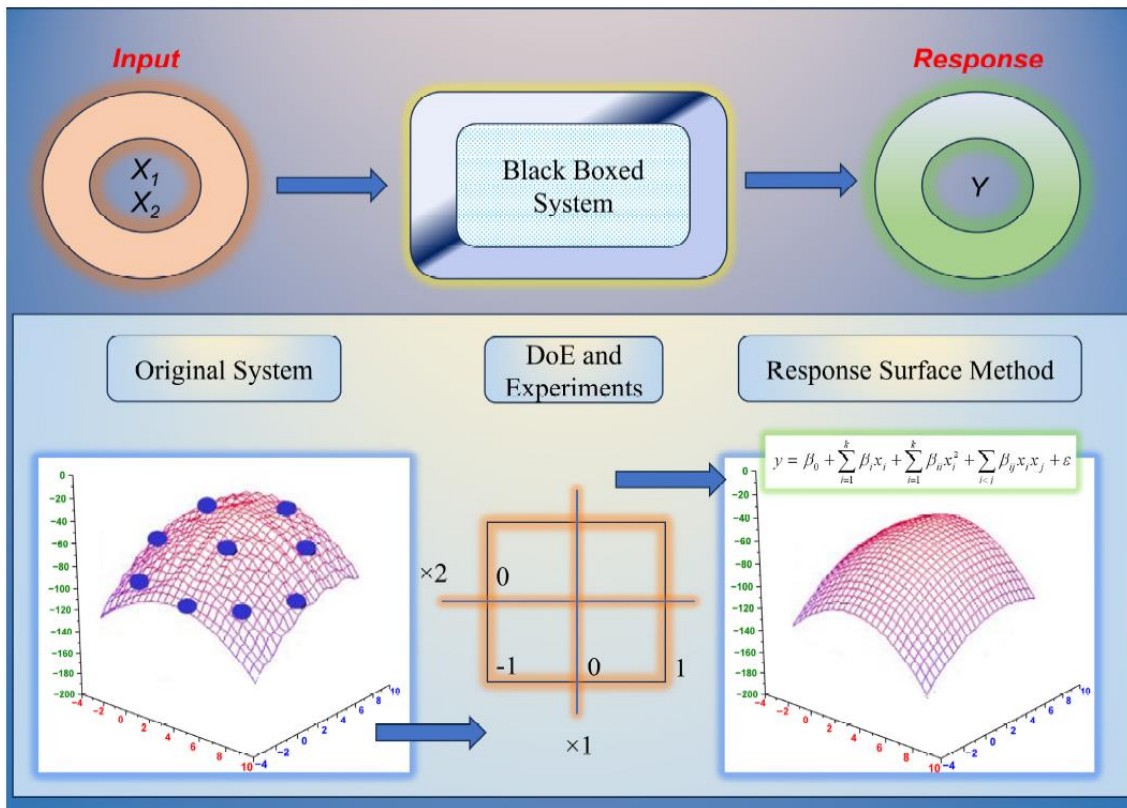


Figure 3.7: Plan Box-Behnken design (BBD)[9]

Le plan Box-Behnken (BBD) généré par le logiciel Design expert (version 7.0) a été privilégié par rapport à d'autres plans comme le plan composite central (CCD), car il est plus efficace. En effet, il nécessite un plus petit nombre d'expériences (15 pour trois facteurs contre 20 ou davantage pour le CCD), ce qui a permis de gagner du temps au niveau des expérimentations tout en consommant moins de ressources, tout cela sans perte de précision pour la capacité de prévision du modèle. Par ailleurs, le fait que le BBD ne génère pas d'expériences dans les combinaisons extrêmes des facteurs permet de repousser moins les limites des facteurs et de s'assurer que les variables du processus restent dans des plages de travail stables et raisonnables. Un autre avantage du plan BBD est qu'il s'adapte bien à l'optimisation de procédé en thermique et solaire, notamment lorsqu'il est important d'étudier les effets d'interactions et les effets quadratiques pour mieux comprendre le comportement du procédé. De plus, le fait que l'espace de recherche du plan BBD soit sphérique et sa relative insensibilité à d'éventuelles erreurs de mesure conforte son usage dans cette étude. Ensuite, les modèles statistiques ont été validés par l'analyse de variance (ANOVA), puis les équations de régression ont été employées pour estimer les conditions de fonctionnement optimales. L'ajustement du modèle quadratique a été jugé satisfaisant à l'aide des coefficients de détermination ( $R^2$ ),  $R^2$  ajusté et  $R^2$  prédit, ce qui a permis de confirmer la pertinence du plan pour l'optimisation. Les différentes analyses effectuées à l'aide de graphiques, confirment la validité du modèle établi. D'un côté, le graphique de la distribution normale des résidus (Figure 3.7) révèle que les points suivent un trait diagonal plutôt bien. Cela indique que les

Le plan Box-Behnken (BBD) généré par le logiciel Design expert (version 7.0) a été privilégié par rapport à d'autres plans comme le plan composite central (CCD), car il est plus efficace. En effet, il nécessite un plus petit nombre d'expériences (15 pour trois facteurs contre 20 ou davantage pour le CCD), ce qui a permis de gagner du temps au niveau des expérimentations tout en consommant moins de ressources, tout cela sans perte de précision pour la capacité de prévision du modèle. Par ailleurs, le fait que le BBD ne génère pas d'expériences dans les combinaisons extrêmes des facteurs permet de repousser moins les limites des facteurs



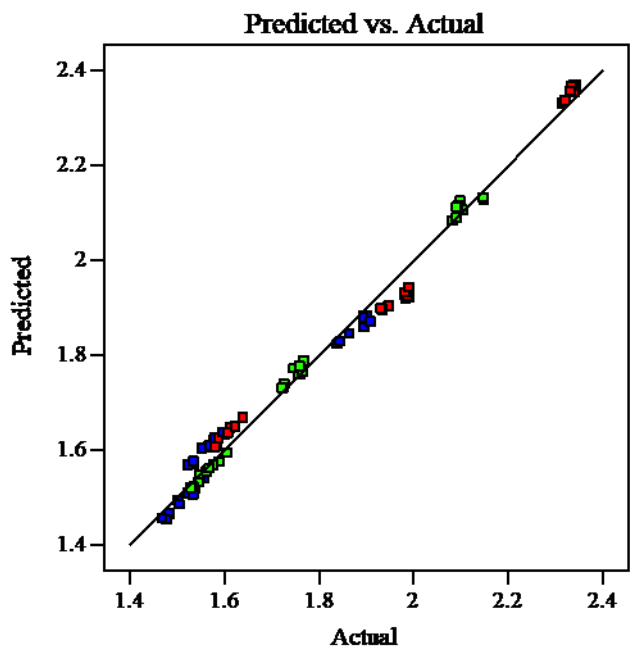
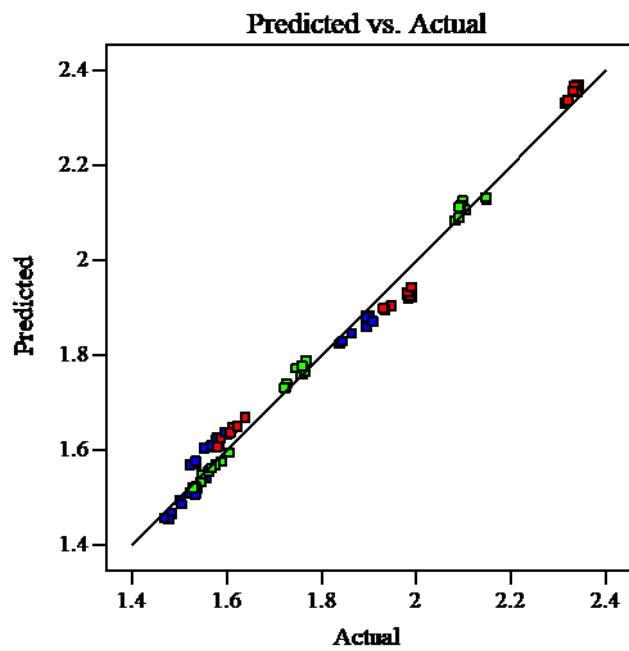
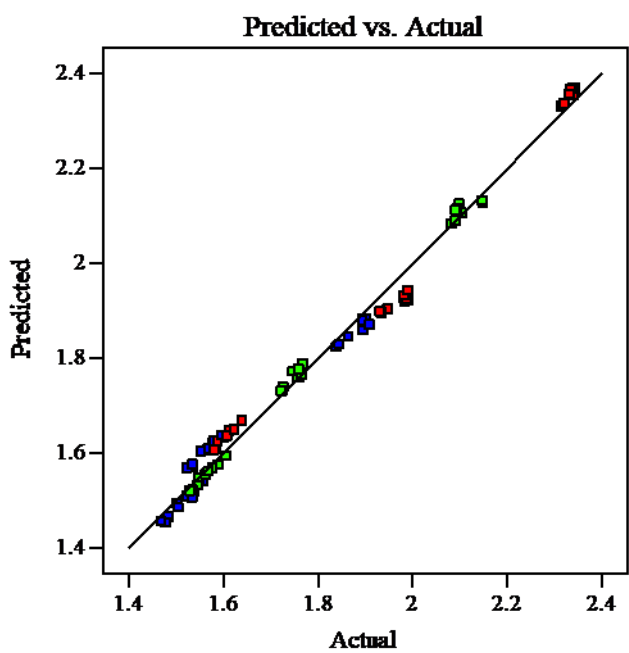


Figure 3.9 : Graphes de validation du modèle statistique (Predicted vs. Actual).

## **Chapitre 4 :Essai Expérimentale et Résultats discussion**

Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken. Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken. Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken. Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken. Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken. Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken. Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken. Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken.

Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken. Ce chapitre présente l'étude des angles du cuiseur solaire à boîte (CSB) en termes de performances énergétiques et thermiques, sur la base de la méthode des surfaces de réponse (RSM) par le plan Box–Behnken.

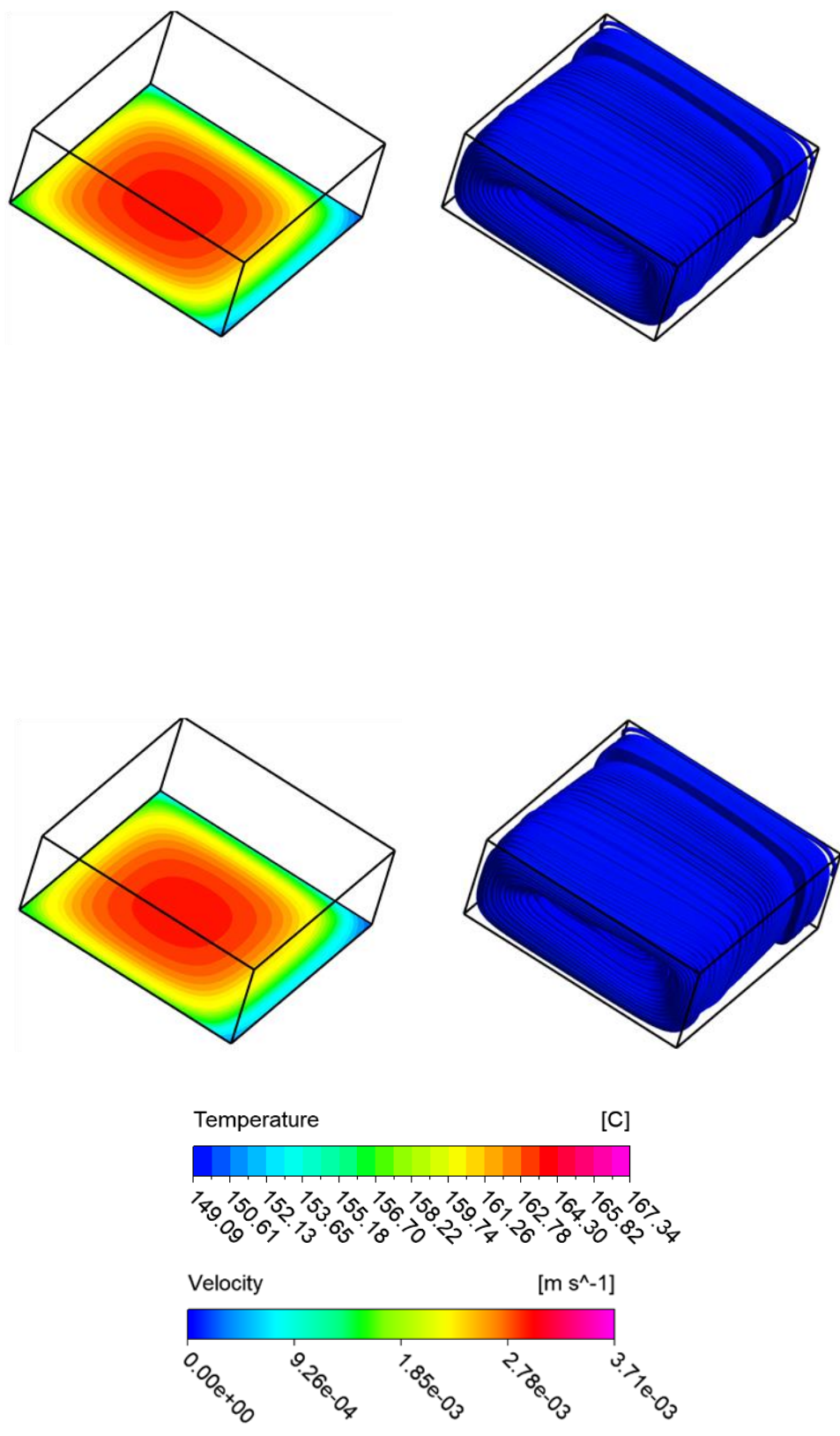


Figure 4.1 : Contours de température et de lignes de courant.



influence thermo fluide que sur les performances du SBC. Dans cette section, les effets d'interaction entre les paramètres de conception angulaire sont systématiquement analysés pour découvrir leur influence thermo fluide que sur les performances du SBC. Les lignes de contour présentent une orientation diagonale et sont régulièrement espacées, ce qui indique une interaction principalement additive sans comportement non linéaire évident.

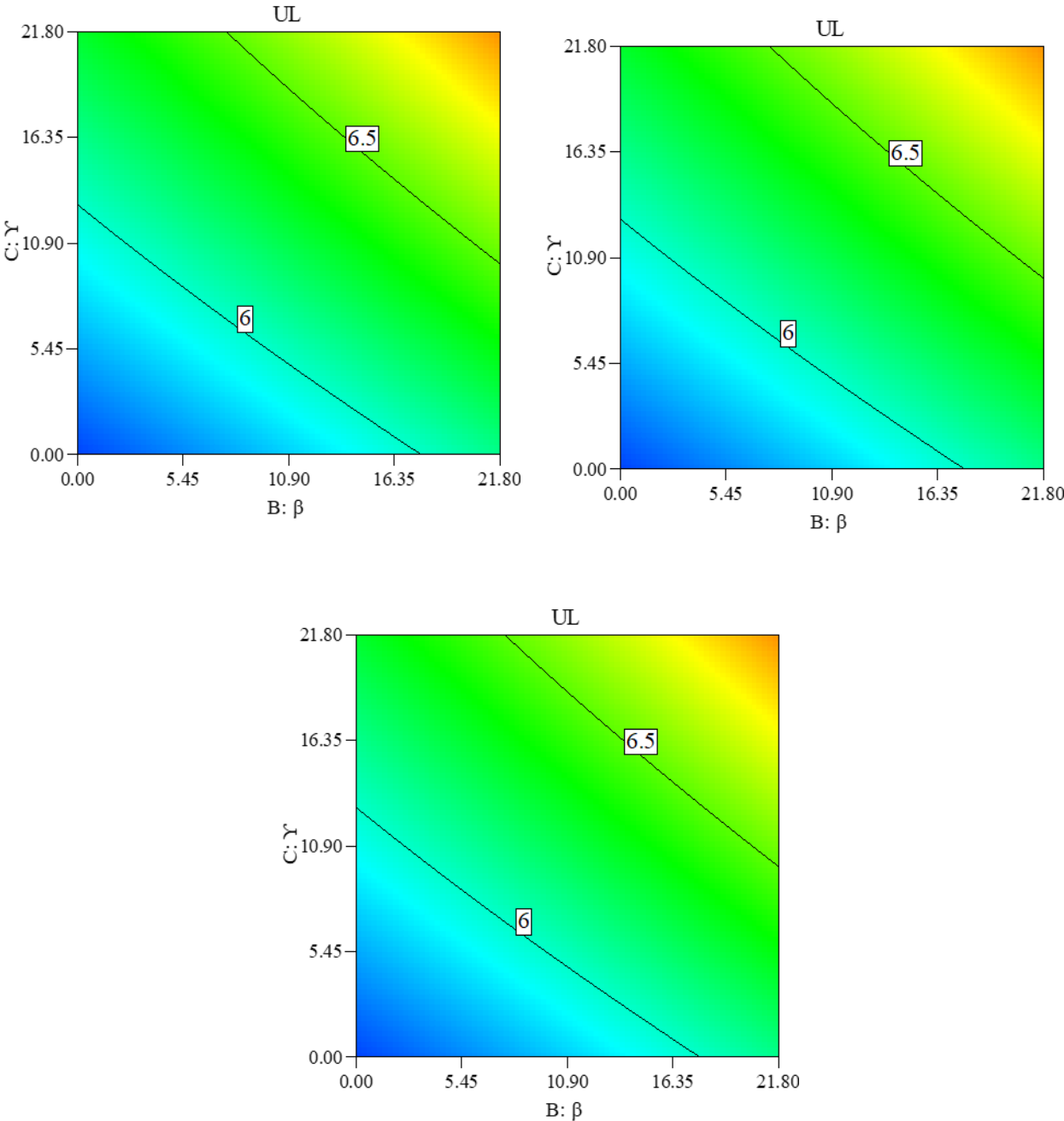


Figure 4.2: Interaction entre les paramètres angulaires

## 4.2 Prédiction de la géométrie optimale :

Suite à l'analyse des interactions réalisée à l'aide de la méthode des surfaces de réponse (RSM) avec un plan Box–Behnken, une série de solutions optimales (Tableau) a été générée afin d'identifier la configuration géométrique la plus performante pour le cuiseur solaire à boîte. Les résultats sont classés selon un critère de "desirability " global, qui permet de trouver un compromis optimal entre plusieurs objectifs : réduction du coefficient de perte thermique, amélioration de l'uniformité thermique et augmentation du flux thermique absorbé.

Suite à l'analyse des interactions réalisée à l'aide de la méthode des surfaces de réponse (RSM) avec un plan Box–Behnken, une série de solutions optimales (Tableau) a été générée afin d'identifier la configuration géométrique la plus performante pour le cuiseur solaire à boîte. Les résultats sont classés selon un critère de "desirability " global, qui permet de trouver un compromis optimal entre plusieurs objectifs : réduction du coefficient de perte thermique, amélioration de l'uniformité thermique et augmentation du flux thermique absorbé.

*Tableau 4.1 Résultats de la prédiction de la géométrie optimale du CBS.*

Suite à l'analyse des interactions réalisée à l'aide de la méthode des surfaces de réponse (RSM) avec un plan Box–Behnken, une série de solutions optimales (Tableau) a été générée afin d'identifier la configuration géométrique la plus performante pour le cuiseur solaire à boîte. Les résultats sont classés selon un critère de "desirability " global, qui permet de trouver un compromis optimal entre plusieurs objectifs : réduction du coefficient de perte thermique, amélioration de l'uniformité thermique et augmentation du flux thermique absorbé.

## 4.3 Réalisation expérimentale des cuiseurs solaires :

À l'issue de la phase de simulation et d'optimisation, deux prototypes de cuiseurs solaires à boîte ont été fabriqués afin de valider expérimentalement les performances thermiques. Le premier correspond au modèle **standard**, basé sur une géométrie conventionnelle issue de la littérature, tandis que le second adopte la **configuration géométrique optimisée** prédite par la méthode des surfaces de réponse (RSM).

Les deux cuiseurs ont été construits à partir des mêmes matériaux afin de garantir une comparaison objective :

**Structure extérieure** : bois contreplaqué pour l'isolation mécanique et thermique ;

**Cavité interne** : revêtement noir mat à haute absorption thermique ;

**Vitrage** : verre simple transparent, monté avec une inclinaison variable selon la géométrie.

**Isolation** : panneaux de liège

**Couvercle** : ouverture frontale avec charnière, permettant un bon angle d'incidence solaire.

Des essais en conditions extérieures ont ensuite été réalisés pour mesurer les températures internes, le flux solaire incident et valider la supériorité thermique du cuiseur optimisé.



Figure 4.3 : Comparaison entre le cuiseur solaire standard et optimisé.

#### 4.4 Essai expérimental de cuisson :

Un test expérimental a été réalisé le **18 juin à Annaba (quartier Chaibaa)** afin d'évaluer l'efficacité réelle du cuiseur solaire optimisé par rapport au modèle standard. L'essai a débuté à **12h00**, heure à laquelle l'ensoleillement était suffisamment intense pour permettre une cuisson effective. Le protocole consistait à **cuire du riz** dans des conditions identiques pour les deux cuiseurs (même quantité d'eau, même masse de riz, mêmes récipients).

L'objectif principal de ce test était de vérifier **l'impact de la géométrie optimisée sur le temps de cuisson**. Les observations ont permis de constater que le cuiseur optimisé atteignait plus rapidement les températures nécessaires à la cuisson, réduisant ainsi le temps total requis pour la préparation du riz. Ces résultats confirment la pertinence de l'optimisation géométrique proposée.



Figure 4.4 : Comparaison entre le cuiseur solaire standard et optimisé.

La Figure

montre que le cuiseur solaire optimisé permet une élévation de température du riz plus rapide

4.5

que le modèle standard. Après 60 minutes, le riz atteint environ **63 °C** avec la version optimisée contre **58 °C** avec la version standard. Cette amélioration thermique confirme l'efficacité de la géométrie optimisée. Elle se traduit par une meilleure captation solaire et une réduction des pertes thermiques.

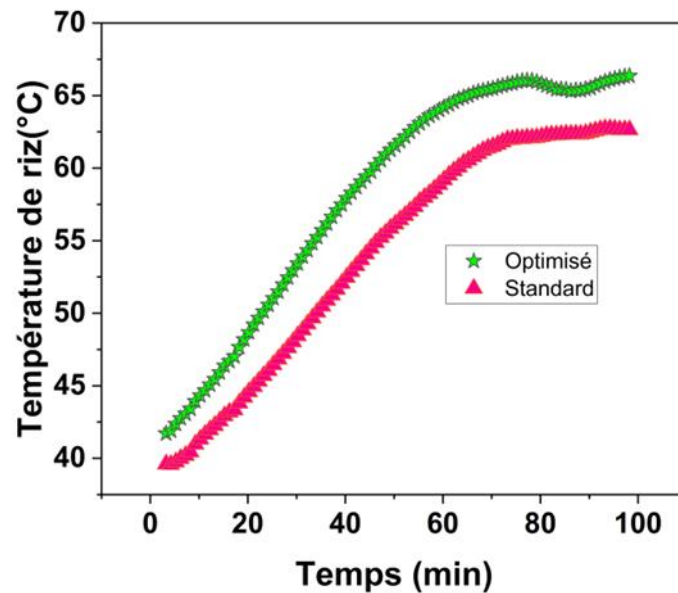


Figure 4.5 : Comparaison entre la température de riz de cuiseur solaire standard et optimisé.

Le tableau met en évidence le gradient de température entre le centre et l'extrémité de la plaque absorbante. Ce gradient atteint **20,57 °C** dans le box standard, contre seulement **7,65 °C** dans le modèle optimisé. La conception géométrique optimisée permet ainsi une meilleure homogénéité thermique sur la surface de cuisson. Cela améliore la qualité de cuisson et réduit les zones froides.

Tableau 4.2 : Gradient de température ( $\Delta T$ ) entre le centre et l'extrémité de la plaque absorbante pour les cuiseurs solaires standard et optimisé

Box solaire	$\Delta T$ (°C)
Standard	20.57
Optimisé	7.65

La Figure 4.6 illustre l'évolution de la température de la plaque absorbante dans les deux cuiseurs. Le modèle optimisé atteint une température plus élevée, dépassant **93 °C**, contre environ **85 °C** pour le modèle standard. Cette différence indique une meilleure absorption du

rayonnement solaire. La conception optimisée améliore ainsi le rendement thermique global du système.

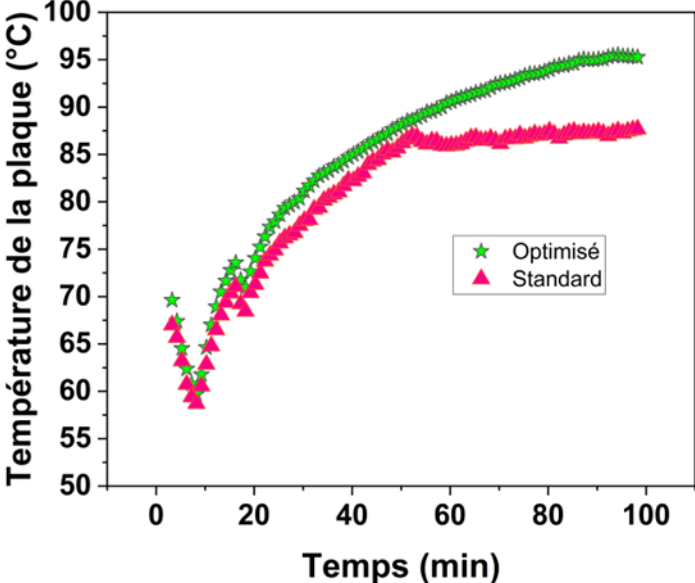


Figure 4.6 : l'évolution de la température de la plaque absorbante dans les deux cuiseurs

## **Conclusion :**

À l'issue de ce travail, nous avons pu concevoir et optimiser un cuiseur solaire de type boîte aux meilleures performances thermiques, adapté aux forts ensoleillements. Pour ce faire, nous avons procédé à une modélisation numérique du cuiseur solaire à l'aide du logiciel ANSYS Fluent couplé à une méthode d'optimisation par la Surface de Réponse (RSM) qui a permis d'obtenir la meilleure configuration. À l'issue de ce travail, nous avons pu concevoir et optimiser un cuiseur solaire de type boîte aux meilleures performances thermiques, adapté aux forts ensoleillements. Pour ce faire, nous avons procédé à une modélisation numérique du cuiseur solaire à l'aide du logiciel ANSYS Fluent couplé à une méthode d'optimisation par la Surface de Réponse (RSM) qui a permis d'obtenir la meilleure configuration.

En définitive, ce travail d'étude et de développement de cuiseur solaire adapté aux besoins des populations des zones hors réseau, s'il n'est pas achevé, apporte plusieurs réponses. Des perspectives sont à étudier, en termes de matériaux absorbants ou de suivi solaire par exemple, qui permettraient d'améliorer encore les performances du cuiseur solaire de type boîte. Ce projet s'inscrit dans une démarche de développement durable accessible et ouvert à tous les corps de métiers de demain.

## Références bibliographiques :

- [1] Al-Nehari H.A., Mohammed M.A., Odhah A.A., et al. (2021). *Experimental and numerical analysis of tiltable box-type solar cooker with tracking mechanism*. Renewable Energy, 180, 954–965. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.125>
- [2] Arunachala U.C., Kundapur A. (2020). *Cost-effective solar cookers: a global review*. Solar Energy, 207, 903–916. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.026>
- [3] Khatri R. et al. (2021). *Advances in the developments of solar cooker for sustainable development: a comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111166>
- [4] El-Sebaï A.A., Domanski R., Jaworski M. (1994). *Experimental and theoretical investigation of a box-type solar cooker with multi-step inner reflectors*. Energy, 19(10), 1011–1021. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90088-4)
- [5] Gharbi M., Benghanem M., Draoui B. (2011). *Étude expérimentale d'un four solaire de type boîte à réflecteur orientable*. Revue des Énergies Renouvelables, 14(3), 467–474.
- [6] Hamlati B., Mili F., Hamou A. (2015). *Optimisation thermique d'un cuiseur solaire par amélioration des matériaux d'isolation et de captation*. Journal of Renewable Energies, 18(2), 233–240.
- [7] Mebarkia A., Zerrouki H., Benouaret L. (2020). *Conception d'un four solaire économique adapté aux régions ensoleillées*. Revue des Énergies Renouvelables, 23(1), 103–110.
- [8] Guidara Z., Souissi M., Morgenstern A., Maalej A. (2017). *Thermal performance of a solar box cooker without reflectors: numerical study and experimental investigation*. Solar Energy, 158, 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.054>.
- [9] Chitharaj, R., Perumal, H., Almeshaal, M., & Kumar, P. M. (2025). *Optimizing Performance of a Solar Flat Plate Collector for Sustainable Operation Using Box–Behnken Design (BBD)*. Sustainability, 17(2), 461. <https://doi.org/10.3390/su17020461>