

Etude numérique de l'effet de la configuration du récepteur sur les performances d'un capteur solaire parabolique

Numerical study of receiver configuration effect on the performance of a parabolic solar collector

Hiba Cherif¹, Jalila Sghaier¹, Hatem Mhiri¹

¹ Laboratoire de thermique et thermodynamique des procédés industriels, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir Monastir 5000, Tunisie, hiba.cherif@yahoo.fr

RÉSUMÉ. Dans cet article, une étude numérique du flux de rayonnement et de la distribution de température d'un récepteur parabolique est réalisée. Le code SOLTRACE est utilisé pour prédire la distribution du flux de rayonnement et le logiciel FLUENT est utilisé pour étudier la distribution de la température.

Dans un premier temps, la répartition du flux solaire concentré est calculée à l'aide du logiciel SOLTRACE

La distribution de flux de chaleur calculée obtenue est ensuite utilisée comme conditions aux limites de flux de chaleur de paroi pour le récepteur. Dans une deuxième étape de cette étude, les performances thermiques du récepteur sont optimisées par une simulation utilisant le code CFD commercial FLUENT.

Différentes configurations de récepteurs sont étudiées afin de définir la configuration optimale pour obtenir les meilleures performances. Le premier est un récepteur cylindrique avec une entrée tangentielle située au fond et une sortie concentrique normale située à sa surface supérieure et le second est un absorbeur en spirale de 19 spires avec une entrée sur sa périphérie et une sortie sur la spirale centrale.

L'effet des différentes positions d'entrée-sortie du fluide de travail est réalisé. Deux positions sont étudiées : la première position est caractérisée par une entrée par la périphérie et une sortie par la spirale centrale et la seconde par une entrée par la spirale centrale et une sortie par la périphérie.

L'analyse thermique a prouvé que le tube spiralé à 19 spires avec une entrée par la périphérie et une sortie par la spirale centrale est la meilleure configuration qui améliore l'efficacité du récepteur solaire et les performances globales de la parabole solaire.

ABSTRACT. In this paper, a numerical study of the radiation flux and temperature distribution of a parabolic dish receiver is carried out. The SOLTRACE code is used to predict the radiation flux distribution and the FLUENT software is used to study the temperature distribution.

In a first step, the concentrated solar heat flux distribution is calculated using the SOLTRACE software

The calculated heat flux distribution obtained is then used as wall heat flux boundary conditions for the receiver.

In a second step of this study, the receiver's thermal performance is optimized by a simulation using the commercial CFD code FLUENT.

Different receiver configurations are studied in order to define the optimal configuration to obtain the best performance.

The first is a cylindrical receiver with a tangential inlet located at the bottom and a normal concentric outlet located at its upper surface and the second is a spiral absorber of 19 turns with an inlet across its periphery and an outlet across the central spiral.

The effect of the different inlet-outlet positions of the working fluid is carried out. Two positions are studied: the first position is characterized by an inlet through the periphery and an outlet through the central spiral and the second by an inlet through the central spiral and an outlet through the periphery.

The thermal analysis has proven that the 19-turn spiral tube with an inlet through the periphery and an outlet through the central spiral is the best configuration that improves the efficiency of the solar receiver and the overall performance of the solar dish.

MOTS-CLÉS. Concentrateur solaire parabolique, Énergie solaire, configurations de récepteur, Positions d'entrée-sortie, Répartition de la température.

KEYWORDS. Parabolic dish, Solar energy, Receiver configurations, Inlet-outlet positions, Temperature distribution.

1. Introduction

En raison de l'augmentation du prix des énergies fossiles, du pic pétrolier et de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables attirent de plus en plus l'attention ces dernières années.

L'une des plus importantes énergies renouvelables disponibles aujourd'hui est l'énergie solaire. C'est une source d'énergie propre très abondante qui n'émet aucun gaz à effet de serre. En outre, divers systèmes et applications thermiques sont basés sur cette énergie. Ghodbane, M. et al. [GHO 20] ont expliqué les types de concentrateurs solaires, à savoir les concentrateurs ponctuels et les concentrateurs linéaires dans le but de clarifier ses principes et ses multiples utilisations domestiques et industrielles, en particulier dans les zones caractérisées par l'abondance de son rayonnement solaire direct.

Parmi les nombreuses technologies développées pour l'utilisation de l'énergie solaire, les plats paraboliques ont le meilleur rapport de concentration. Pour cette raison, de nombreux chercheurs s'intéressent à cette technologie. Il est fréquemment utilisé pour concentrer le rayonnement solaire incident afin de chauffer un fluide de travail à une température moyenne ou élevée, citant la production d'hydrogène solaire (Furler et al.) [FUR 12] Système Dish-Stirling (Mills) [MIL 04] et cuiseur solaire (Badran et al.) [BAD 10].

La mesure de la distribution du flux focal est très nécessaire pour évaluer les performances optiques de ce dernier. La méthode de lancer de rayons de Monte-Carlo est une méthode fréquemment utilisée dans le domaine de l'énergie solaire pour déterminer le flux solaire concentré et la distribution d'énergie optique [STE 93-JOH 98-SHU 08]. Il est simple à coder et a été développé par de nombreux chercheurs (Johnston ; Shuai et al. ; Daly) [JOH 98-SHU 08-DAL 79].

Jones et Wang [JON 95] ont également calculé le flux solaire concentré sur un récepteur cylindrique d'une antenne parabolique en introduisant une méthode optique géométrique. De même, Johnston [JOH 95-JOH 03] a utilisé le code COMPREC (acronyme de COMPOUND RECEIVER) pour étudier la distribution du flux de rayonnement du "Big Dish" de 400 m² à l'Université nationale australienne. Jaramillo [JAR 08] a appliqué une méthode analytique pour évaluer l'énergie arrivant au foyer d'un petit miroir parabolique.

Tous ces auteurs n'ont traité que le comportement optique sans étudier le comportement thermique en présence d'un fluide caloporteur. Quelques études sur le comportement thermique combiné à optique d'une parabole couplée à un récepteur ont été menées. De plus, les références bibliographiques sur l'analyse thermo-fluide du récepteur sont rares.

Abid, M. et al. [ABI 20] ont examiné les performances d'une centrale multi-génération en intégrant un capteur solaire parabolique à une turbine à vapeur et un refroidisseur à absorption produisant de l'électricité et traitant de la chaleur et du refroidissement. La modélisation thermodynamique de la centrale multi génération intégrée à parabole solaire proposée est mise en œuvre numériquement pour étudier l'effet de certains paramètres de fonctionnement sur les performances du système intégré.

Alnaqi, A. et al. [ALN 21] ont étudié numériquement l'amélioration de l'efficacité hydrothermique d'un capteur solaire parabolique semi-conique rempli d'un nanofluide hybride à base d'huile. Ils ont conclu que l'utilisation du nanofluide augmente considérablement les performances thermiques du système. L'analyse exergetique montre que la croissance de la quantité de nanoparticules augmente le coefficient de convection et la perte de charge, mais conduit à une efficacité exergetique plus élevée.

Une station laser solaire multitige pour le four solaire mégawatt (MWSF) à Odeillo, en France, a été conceptualisée et étudiée numériquement par Costa, H. et al. [COS 22] pour améliorer l'efficacité de conversion de puissance solaire-laser. 18 héliostats du champ de 63 héliostats ont été sélectionnés et 347 kW d'énergie solaire ont été obtenus à son foyer.

Liu, J. et al. [LIU 23] ont mis en œuvre un modèle de fluide thermique qui intègre une analyse de la perte de chaleur pour décrire les processus de flux et de transfert de chaleur du récepteur d'un capteur solaire parabolique, réduisant ainsi les coûts de calcul. Les résultats du modèle de fluide thermique sont comparés à ceux de la simulation numérique, ce qui nous permet de vérifier la précision du modèle de fluide thermique établi. Une étude est développée par Tao Yu et al. (2015) [YU 15], dans lesquels, ils étudient le flux solaire concentré et la distribution de température d'un récepteur en tôle d'acier. Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats numériques étudiés par le logiciel commercial FLUENT. Dans cet article, la configuration de Tao Yu et al. (2015) [YU 15] est pris en considération afin de valider nos résultats numériques réalisés à l'aide de la méthode de lancer de rayons de Monte Carlo et du code commercial CFD FLUENT avec les résultats expérimentaux de Tao Yu et al. [YU 15]. L'effet des configurations du récepteur et des positions entrée-sortie du fluide de travail a été étudié à l'aide du logiciel FLUENT afin de définir et d'optimiser les performances thermiques du récepteur.

2. Matériel et méthodes

Pour étudier les performances thermiques de la parabole solaire par simulation numérique, nous prenons la configuration similaire de Tao Yu et al.

2.1. Calcul du flux solaire par SOLTRACE

SOLTRACE est un logiciel développé au Laboratoire National des Energies Renouvelables (NREL) très utilisé dans le domaine de l'énergie solaire pour modéliser les systèmes solaires à concentration et analyser leurs performances optiques.

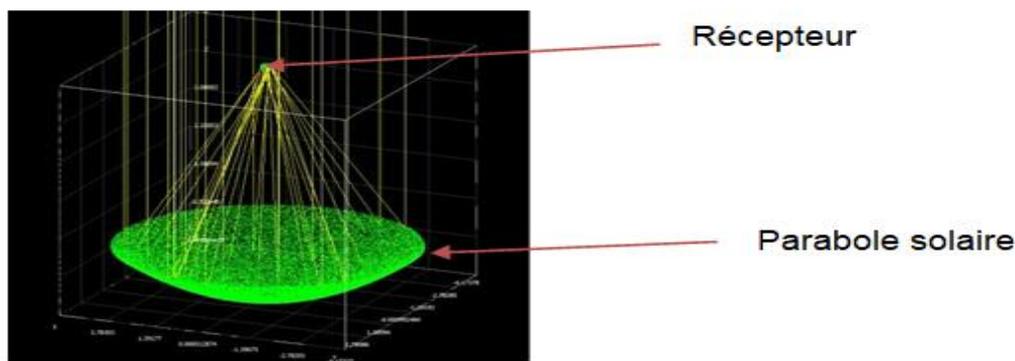


Figure 1. Schéma du concentrateur parabolique

Parabole solaire	Valeur
Diamètre	4.175 m
Longueur focal	4.5 m
Réfectivité	92%
Transmissivité	8%

Tableau 1. Paramètres géométriques et propriétés optiques de la simulation

2.2. Configuration géométrique et maillage

La création de la géométrie de la parabole est faite par GAMBIT 2.3. Les mêmes dimensions, propriétés et matériaux de la configuration de Tao Yu et al. [YU 15] sont introduits pour la simulation CFD. Le maillage généré dans le modèle géométrique est constitué de cellules hexaédriques. Un test d'indépendance du réseau a également été réalisé. Un maillage à trois mailles a été utilisé pour tester la sensibilité de la solution au raffinement du maillage constitué respectivement de 230 030 cellules, 468

600 cellules et 670 800 cellules. Pour les mailles 2 et 3, l'écart entre les résultats est égal à 0,05% alors que la première grille donne des profils très différents. Pour cette raison, la taille de maille optimale obtenue avec 468 600 cellules a été utilisée pour le tube récepteur afin de réduire les calculs. Le maillage optimal est ensuite exporté vers le logiciel FLUENT [FLU 05] pour la résolution. La configuration détaillée du maillage et de la condition aux limites est illustrée sur la figure 2.

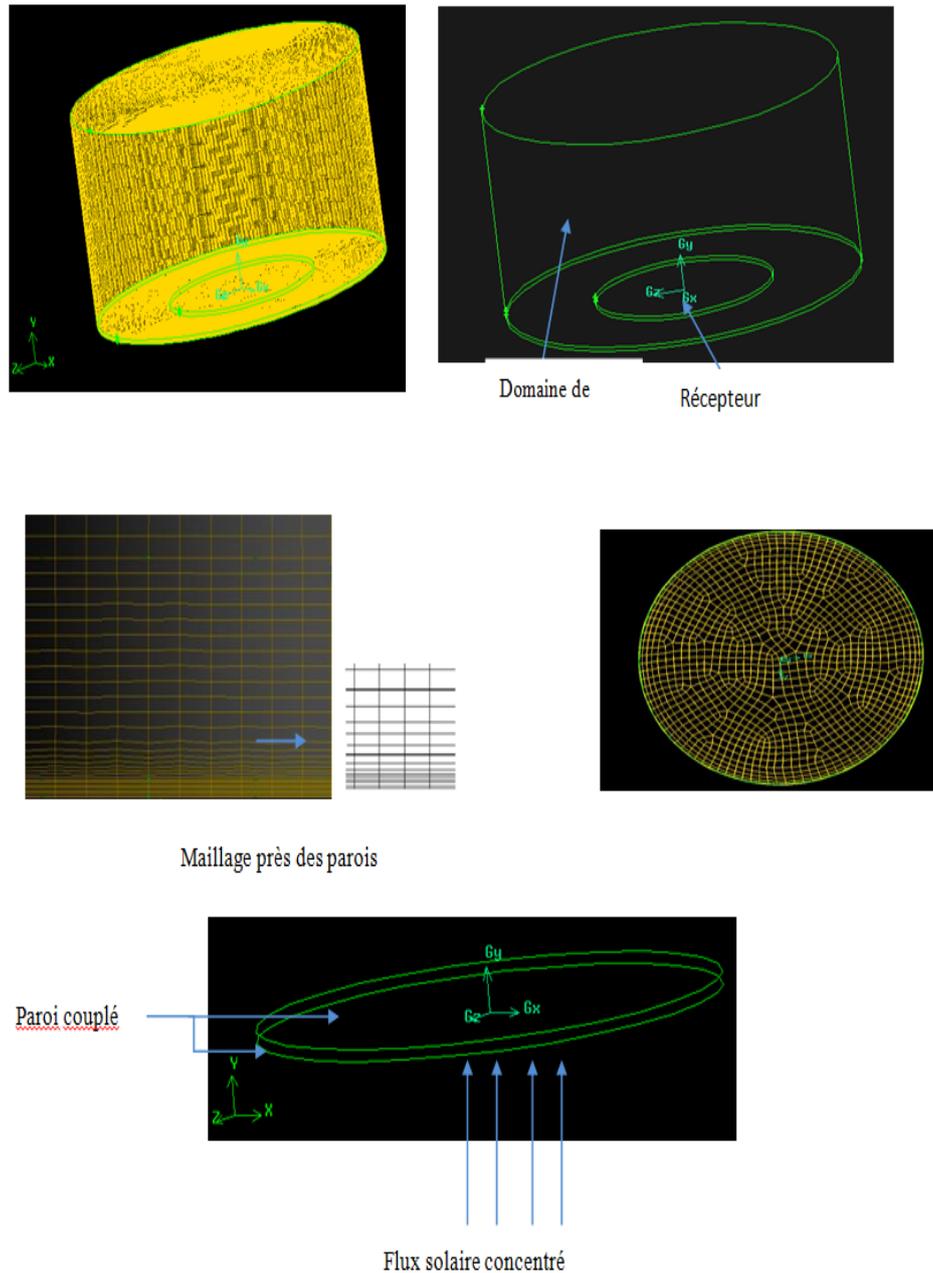


Figure 2. Détails du maillage et conditions aux limites de la configuration.

2.3. Hypothèses et conditions aux limites

Les hypothèses simplificatrices considérées dans ce travail sont les suivantes :

- Régime permanent ;
- Le flux est turbulent ;
- Fluide gaz parfait incompressible.

Les conditions aux limites utilisées lors de la validation du modèle numérique sont définies comme suit :

–La surface latérale de la plaque et les surfaces inférieure et supérieure de l'absorbeur sont considérées comme "paroi" $u=v=w=0$.

–La surface inférieure de l'absorbeur exposée au réflecteur est soumise à une répartition non uniforme du flux de chaleur solaire calculée par le logiciel SOLTRACE.

–Les surfaces supérieures et latérales de l'absorbeur sont définies comme « couplées ».

–Pour l'autre configuration étudiée, les différentes conditions aux limites utilisées sont représentées sur la Fig. 3 et citées ci-dessous :

–La surface latérale de la plaque, les surfaces inférieure et supérieure de l'absorbeur et le tube spiralé sont considérés comme "paroi" $u=v=w=0$.

–La surface inférieure de l'absorbeur exposée au réflecteur est soumise à une répartition non uniforme du flux de chaleur solaire calculée par le logiciel SOLTRACE.

–les surfaces latérales et supérieures de l'absorbeur et du tube spiralé sont définies comme "couplées".

–Les conditions aux limites appliquées à l'entrée et à la sortie du fluide de travail sont les suivantes :

–Entrée : “mass flow inlet” : ce type de condition est considéré pour un flux entrant.

–Sortie : sortie de pression. Cette condition indique que cette surface est maintenue à une pression statique constante qui est une pression atmosphérique ($P = 1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$).

–L'argon est considéré comme le fluide de travail circulant dans le récepteur. Les propriétés physiques du fluide de travail sont traitées comme une fonction polynomiale de la température [14].

–Le nombre de Reynolds Re est calculé selon la relation $Re = (\rho v d) / \mu$. Une valeur de $Re = 22968$ est trouvée. Cette valeur est supérieure à la valeur critique et correspond à l'écoulement turbulent.

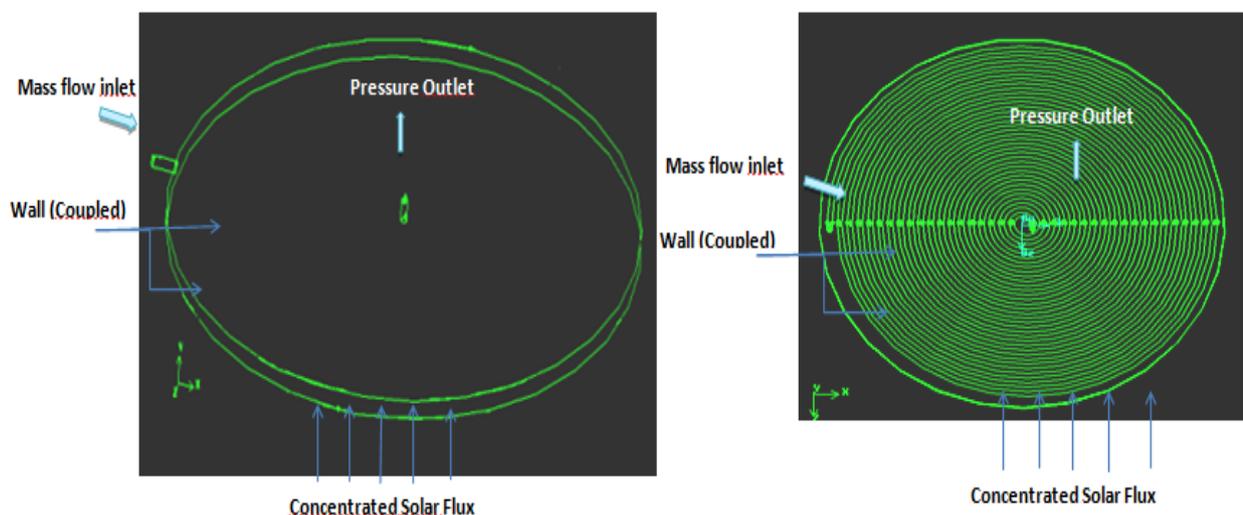


Figure 3. Les conditions aux limites des différentes configurations

3. Simulation numérique

Les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie sont résolues numériquement par le logiciel FLUENT. Le modèle de rayonnement P1 est adopté pour résoudre le transfert de chaleur par rayonnement thermique dans les simulations numériques.

L'algorithme SIMPLE est utilisé pour déterminer le champ de couplage pression-vitesse. Le modèle standard k-epsilon est adopté comme modèle de fermeture de turbulence. Le schéma au vent du premier ordre est appliqué pour toutes les équations à l'exception des équations de quantité de

mouvement et d'énergie qui sont discrétisées en utilisant le schéma au vent du second ordre. Le critère de convergence de 10^{-3} est défini pour toutes les équations à l'exception de l'énergie et P1 est de l'ordre de 10^{-6} .

3.1. Effet de la configuration du récepteur

La configuration du récepteur est un paramètre important qui influence les performances globales du concentrateur solaire parabolique. Par conséquent, l'effet de différentes configurations de récepteur est étudié. Pour la première configuration, le récepteur solaire est un absorbeur cylindrique de 0,4 m de diamètre et 0,008 m de hauteur ; il a une entrée tangentielle et une sortie normale concentrique située à la surface supérieure d'un diamètre de 0,005 m. Il est fabriqué en acier inoxydable. L'argon est considéré comme le fluide de travail qui pénètre dans l'absorbeur par l'entrée et sort par la sortie. Les propriétés physiques du fluide de travail sont traitées comme une fonction polynomiale de la température [LU 09].

La deuxième configuration est un cylindre avec un tube en spirale de 19 spires. Le diamètre du tube spiralé est de 5 mm. Nous étudions l'effet des spires du tube spiralé sur le comportement du fluide à l'intérieur du récepteur.

Le fluide entre dans le tube en spirale par sa périphérie et sort par la spirale centrale. Les différentes configurations de récepteur étudiées, conçues dans GAMBIT, sont données sur la figure 4.

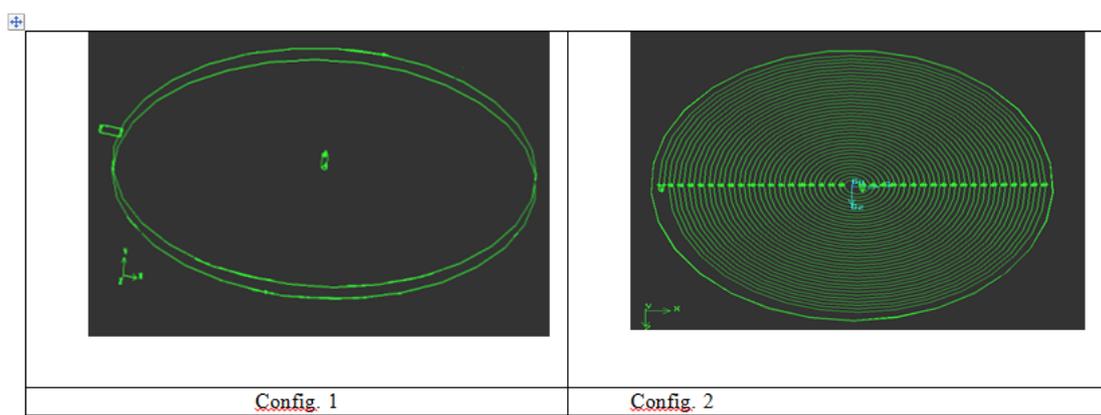


Figure 4. Les différentes configurations étudiées

3.2. Étude thermique de la position entrée/sortie sur un absorbeur spiralé de 19 spires

Le choix de la position optimale d'entrée/sortie de fluide dans le récepteur spiralé de 19 spires est important sur l'amélioration des performances globales du système solaire. Plusieurs études portent sur le choix de la position optimale d'entrée-sortie de fluide [WAN 10]. Pour cette raison, notre étude portera sur ce sujet dans le but de définir la configuration optimale pour obtenir les meilleures performances du système parabolique. L'effet de la position entrée-sortie sur la distribution de température du récepteur en spirale à 19 tours a été étudié. Les positions entrée/sortie testées sont les suivantes : Position 1 : le fluide entre dans le tube spirale par sa périphérie et sort par la spirale centrale. Position 2 : le fluide pénètre dans le tube spiralé par la spirale centrale et ressort par sa périphérie. Les différentes positions sont bien détaillées dans la figure 5.

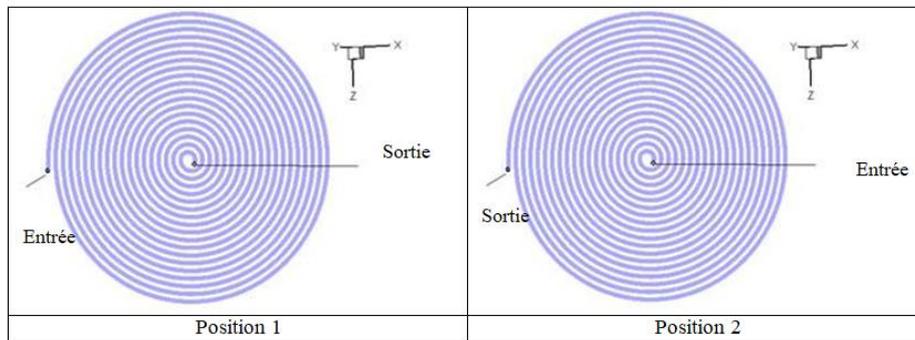


Figure 5. Les différentes positions

4. Résultats et discussion

4.1. Validation de la distribution du flux solaire

Afin de garantir l'efficacité du logiciel SOLTRACE, pour prédire la distribution du flux solaire concentré au point focal du récepteur, une validation est effectuée en comparant les résultats numériques calculés par SOLTRACE avec les données expérimentales recueillies par Tao Yu et al. [YU 15].

Nous prenons en compte les mêmes hypothèses envisagées par Tao Yu et al. [YU 15]. La distribution du flux de chaleur au plan focal de la parabole est comparée à celle obtenue par Tao Yu et al. [YU 15], dans la Fig. 6. On note qu'un bon accord est obtenu entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux de Tao Yu.

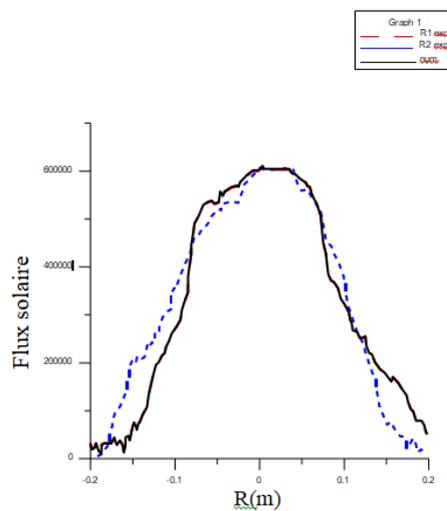


Figure 6. Comparaison entre le code SOLTRACE et les résultats de Tao [TAO 15] de la distribution du flux focal sur un absorbeur de 0,4 m de diamètre

Les résultats sont statistiquement significatifs avec un pourcentage d'erreur moyen de 7,94 %. Ceux-ci confirment que la méthode MCRT utilisée dans la présente étude est faisable et que les résultats numériques sont fiables.

Après s'être assuré de la validité du modèle sur le logiciel SOLTRACE, nous pouvons conclure que la méthode MCRT peut être utilisée pour prédire la distribution du flux solaire concentré sur un récepteur situé au foyer d'une parabole ou dans toute autre application solaire.

4.2. Validation de la distribution de température du récepteur

Afin de valider le processus de transfert de chaleur du récepteur, une irradiation normale directe de $458,3 \text{ W/m}^2$, la même irradiation normale directe de Tao Yu et al. [YU 15], et une forme de soleil

gaussienne sont supposées dans le logiciel SOLTRACE. Ensuite, la distribution du flux de chaleur solaire prédite par ce logiciel est introduite dans le logiciel FLUENT en tant que conditions aux limites thermiques à la paroi réceptrice via UDF. Après cela, les résultats obtenus ont été comparés aux résultats expérimentaux de Tao Yu et al. [YU 15].

L'évolution de la température du récepteur le long de l'axe horizontal et vertical par le logiciel FLUENT est présentée dans la figure 7.

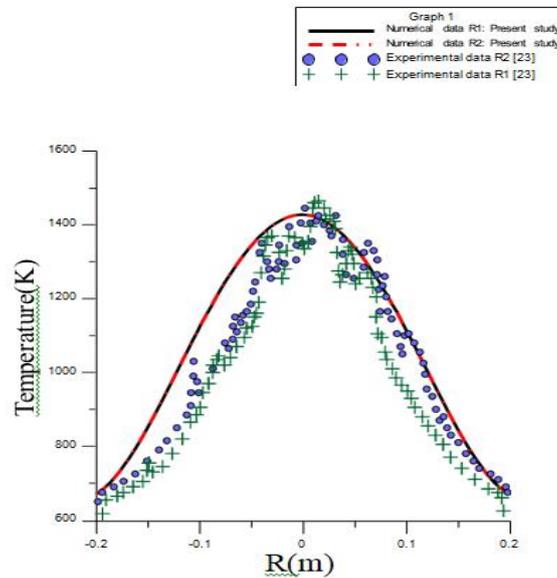


Figure 7. Comparaison entre la distribution de température expérimentale et numérique de la plaque réceptrice

On peut voir sur cette figure que la température numérique du récepteur est très proche et concorde bien avec les résultats expérimentaux de Tao. On constate que les résultats numériques de température du récepteur diffèrent des résultats expérimentaux de Tao et al. [YU 15] de 2,5 %.

Ainsi, nous pouvons prouver la validité du processus de transfert de chaleur du récepteur.

4.3. Effet de la configuration du récepteur

La figure 8 illustre la répartition de la température du fluide de travail à l'intérieur des différentes configurations du récepteur. On constate que la température du fluide de l'absorbeur cylindrique est la plus basse tandis que la température du fluide du tube spiralé de 19 spires est la plus élevée.

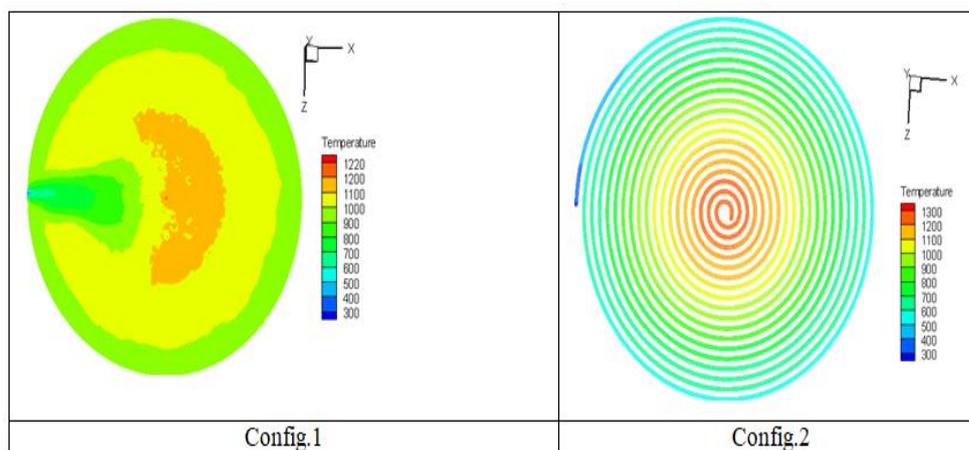


Figure 8. Répartition de la température du fluide pour les différentes configurations

Il est clair que la température du fluide augmente progressivement et atteint son maximum au centre du tube spiralé. Le récepteur est positionné au point focal de la parabole solaire. Tous les rayons du soleil seront concentrés au centre du tube spiralé de 19 spires. Pour cette raison, cette région est la plus chaude. (Voir Fig.9)

Par exemple, la température du fluide en entrée du récepteur est de 300 K alors que la température atteint 1290 K au centre du tube spiralé. Le transfert de chaleur pour cette conception est optimal en raison de la proximité du fluide chaud à l'extrémité du tube en spirale où la distribution du flux solaire concentré est maximale. La différence de température dans le fluide de travail est d'environ 1000 K de l'entrée à la sortie.

La température moyenne de sortie du fluide de l'absorbeur cylindrique est de 1144 K, et pour l'absorbeur en spirale de 19 spires, sa température moyenne de sortie du fluide de travail est de 1256 K.

Le coefficient de transfert de chaleur convectif pour différentes configurations de récepteur est présenté dans le tableau 2. Comme on peut le voir, la réduction des coefficients de transfert de chaleur convectif vers l'environnement (hev) de Config.1 à Config.2 entraîne une diminution des pertes de chaleur vers l'environnement, puis la température de sortie du fluide de travail augmente encore de Config.1 à Config.2.

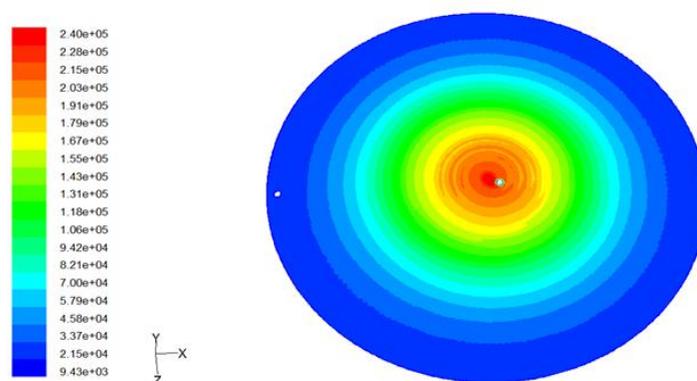


Figure 9. La distribution de flux pour le tube en spirale

Configuration du récepteur	h_{ev}
Absorbeur cylindrique (Config.1)	110 W/m ² K
Tube spiralé de 19 spires (Config.2)	98,58 W/m ² K

Tableau 2. Le coefficient de transfert de chaleur par convection pour différents récepteurs

4.4. Effet de la configuration Entrée / Sortie

Les lignes de courant associées au contour de température du fluide caloporteur pour les différentes positions d'entrée/sortie sont représentées sur la figure 10.

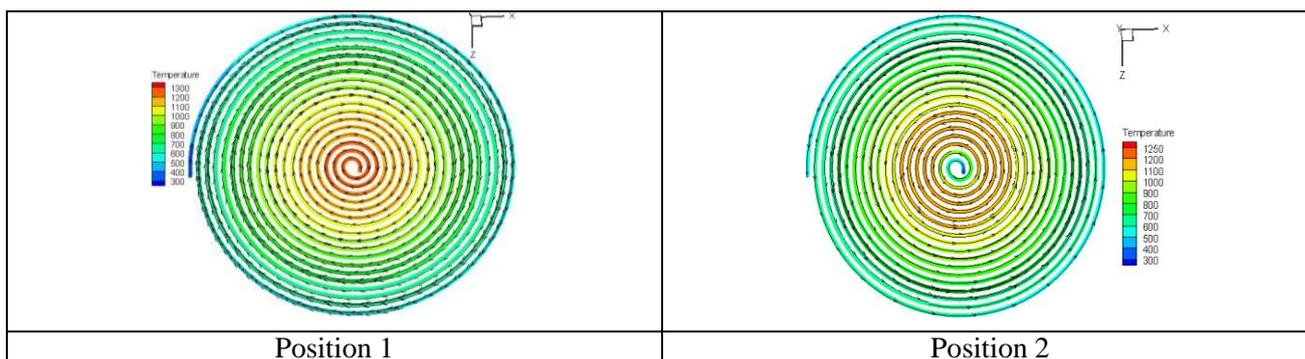


Figure 10. La répartition de la température du fluide

La figure 10 montre que la température du fluide de la position 1 est supérieure à celle de la position 2. On observe clairement qu'au départ, le fluide de travail de la position 1 a une température basse de 300 K. Lors de sa circulation dans l'absorbeur, il absorbe de la chaleur et sa température augmente en se rapprochant du centre du récepteur jusqu'à atteindre la valeur maximale à la sortie. En effet, cela est dû à la répartition concentrée du flux solaire ; elle est maximale au centre et diminue progressivement en s'éloignant du centre du récepteur.

Alors que pour la position 2, la température du fluide est de l'ordre de 300 K à l'entrée, après avoir traversé les 7 premières spires du récepteur, il s'échauffe et sa température augmente jusqu'à 1200 K. Lors de sa circulation dans le reste du récepteur tourne, sa température diminue et atteint une valeur de l'ordre de 600 K en sortie.

Le tableau 3 indique la température moyenne de sortie du fluide pour les différentes positions. La température moyenne de sortie du fluide de la position 1 est égale à 1256 K, tandis que pour la position 2, sa température moyenne de sortie est d'environ 575 K. La température moyenne du fluide diminue de 54% en modifiant la position de 1 à 2.

	Position 1	Position 2
Température moyenne de sortie (K)	1144	1256

Tableau 3. La température moyenne de sortie

De ces analyses, on peut conclure que la position 1, qui est définie en entrant dans le tube spiralé par sa périphérie et en sortant par la spirale centrale, est la position optimale qui permet les meilleures performances du système.

5. Conclusion

Dans cet article, la distribution du flux de rayonnement et la distribution de la température sur la surface du récepteur sont étudiées numériquement par la méthode de lancer de rayons de Monte Carlo en utilisant SOLTRACE et le logiciel Fluent. Un bon accord est observé entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux de Tao [YU 15].

Pour optimiser les performances thermiques du récepteur du système, les conclusions suivantes sont trouvées :

- Le récepteur spiral de 19 spires est la meilleure configuration qui améliore l'efficacité du récepteur solaire et les performances globales de la parabole solaire.
- La position caractérisée par une entrée par la périphérie et une sortie par la spirale centrale est la position optimale qui permet d'obtenir les meilleures performances du système parabolique.

En perspective de ce travail, d'autres facteurs restent à explorer pour le récepteur spiral de 19 spires comme la distance entre les spires, le diamètre de la spire afin d'optimiser la configuration du récepteur.

Bibliographie

[GHO 20] Ghodbane, M., Benmenine, D., Khechekhouche, A., Boumeddane, B. , 2020, "Mémoire sur les concentrateurs solaires : différences et applications", Instrumentation Mesure Métrologie, Vol. 19, No. 5, pp. 371-378

[FUR 12] Furler, P., Scheffe, J.R., Steinfeld A., 2012, "Production de gaz de synthèse par séparation simultanée de H₂O et de CO₂ via des réactions redox de cérium dans un réacteur solaire à haute température", Energy & Environmental Science, 5 (3) , pages 6098–6103.

- [MIL 04] Mills D., 2004, " Avancées dans la technologie de l'électricité solaire thermique ", *Solar Energy*, 76 (1–3), pp. 19–31.
- [BAD 10] Badran, A.A., Yousef, I.A., Joudeh, N.K., Al Hamad, R., Halawa, H., Hassouneh, H.K., 2010, "Portable solar cooker and water heater," *Energy Conversion and Management* 51 (8), pp.1605–1609.
- [STE 93] Steinfeld, A., Schubnell, M., 1993, "Taille d'ouverture optimale et température de fonctionnement d'un récepteur à cavité solaire", *Solar Energy*, 50, pp.19-25.
- [JOH 98] Johnston, G., 1998, "Mesures de la région focale du plat en mosaïque de 20 m² à l'université nationale australienne", *Solar Energy*, 63, pp.117-124.
- [SHU 08] Shuai, Y., Xia, X.L., Tan, H.P., 2008, "Performance de rayonnement des systèmes de concentrateur solaire/récepteur à cavité", *Solar Energy*, 82, pp. 13-21.
- [DAL 79] Daly, J.C., 1979, "Répartition du flux du concentrateur solaire utilisant le traçage vers l'arrière", *Applied Optics*, 18 (15), pp.2696–2700.
- [JON 95] Jones P D., Wang L L., 1995, "Distributions de concentration dans les systèmes récepteurs cylindriques/concentrateurs paraboloides", *Solar Energy*, 54(2), pp. 115–123.
- [JOH 95] Johnston G., 1995, « Flux mapping the 400 m² « Big Dish » at the Australian National University », *Journal of Solar Energy Engineering*, 117 (4), pp. 290–293.
- [JOH 03] Johnston G., Lovegrove K., Luzzi A., 2003, "Performances optiques d'éléments réfléchissants sphériques à utiliser avec des concentrateurs paraboliques", *Solar Energy*, 74(2), pp. 133-140.
- [JAR 08] Jaramillo O A., Perez-Rabago C A., Arancibia-Bulnes C A., Estrada C A., 2008, "Un calorimètre à plaque plate pour l'évaluation du flux solaire concentré", *Renewable Energy*, 33(10), pp. 2322–2328.
- [ABI 20] Abid, M., S. Khan, M., A. H. Ratlamwala, T., P. Amber, K., 2020, " Étude thermo-environnementale d'une centrale multigénération assistée par antenne parabolique solaire utilisant différents fluides de travail ", *Energy research*, Volume 44, Issue 15, pp. 12376-12394
- [ALN 21] A. Alnaqi, A., Alsarraf, J., A.A.A. Al-Rashed, A., 2021, " Étude numérique de l'efficacité hydrothermique d'un capteur solaire à assiette parabolique rempli de nanofluide hybride à base d'huile ", *Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 124, pp 238-257
- [COS 22] Costa, H., Almeida, J., Liang, D., Garcia, D., Catela, M., D. Tibúrcio, B., R. Vistas, C., 2022, " Multirod approach to enhance solar-to-laser conversion efficiency in the Odeillo solar furnace ", *Journal of Photonics for Energy*, Vol. 12, Issue 4, 048001
- [LIU 23] Liu, J., Li, R., Chen, Y., Zheng, J., Wang, K., 2023, " Méthode d'optimisation de la topologie d'un récepteur à cavité et canaux d'écoulement intégrés basés sur le réseau pour un collecteur parabolique solaire ", *Entropy*, 25(3), 398; <https://doi.org/10.3390/e25030398>
- [YU 15] Yu, T., Yuan, Q.Y., Lu, J.F., Ding, J., Lu, Y.L., 2015. " Performances de stockage thermo-chimique du reformage du méthane avec du dioxyde de carbone dans des réacteurs tubulaires et semi-cavités chauffés par un système de parabole solaire", *Appl. Énergie*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.Appliedenergy.2015.10.131>.
- [FLU 05] FLUENT–Inc., 2005. Guide de l'utilisateur FLUENT 6.2, FLUENT. Inc, Documentation FLUENT 6.3.
- [LU 09] Lu, S., Dong, W., Li, D., Li, Y., 2009, " Etude numérique et comparaisons des propriétés de l'arc de tungstène gazeux entre l'argon et l'azote", *Science des matériaux informatiques*. 45, 327–335.
- [WAN 10] Wang, M., Siddiqui, K., 2010, "L'impact des paramètres géométriques sur les performances thermiques d'un récepteur solaire d'un système d'énergie solaire concentrée de type plat", *Renewable Energy*, 35, pp.2501-2513.