

Enhancement of air drying uniformity in solar dryers using CFD.

Benhamza Abderrahmane * : **, Boubekri Abdelghani **, Atia Abdelmalek *, Hadibi Tarik **,
Mennouche Djamel **, Mecheri Ayoub **, Kouici Abdessalam **

* Department of Mechanical Engineering, faculty of technology, University of Echahid Hamma Lakhdar
Eloued, Algeria

** Laboratory of development of new and renewable energies in arid zones (LENREZA)
Ouargla 30000, Algeria

E-mail: Benhamza_abderrahmane@univ-eloued.dz, A.benhamza@gmail.com

Abstract

Dans la présente étude, des mesures expérimentales et une approche combinée entre la simulation numérique (CFD) en 2D et la méthode des plans d'expériences (MPE) a été appliquée dans le but d'optimiser la conception d'un séchoir solaire indirect non ventilé réalisé antérieurement au laboratoire (L.E.N.R.E.Z.A) de l'université de Ouargla. Ces travaux visaient à optimiser la conception de séchoir solaire afin de maximiser la vitesse de l'air à la sortie tout en améliorant la plage de température convenable pour le séchage, ainsi l'homogénéité de distribution du champ thermique dans la chambre de séchage. La méthode des surfaces de réponse (RSM) a été utilisée pour analyser les résultats et optimiser les paramètres suivants : (a) longueur de cheminée avec la plage entre 30 à 120 cm, (b) angle d'inclinaison entre 30° à 90°, (c) largeur de la lame d'air entre 5 à 15 cm, (d) formes de la chambre (rectangulaire ou coudée avec 45°) et (e) positions de la cheminée (centré, gauche et droite). Les résultats de l'optimisation révèlent que les réponses optimales sont obtenues avec une cheminée ordinaire de 30 cm de hauteur, 5 cm de lame d'air, un angle d'inclinaison de 52° et une forme de chambre coudée à 45° avec une cheminée positionnée au centre.

Keywords: Simulation numérique, optimisation, plans d'expériences.

1. Introduction

Le séchage au soleil est la méthode traditionnelle la plus couramment utilisée pour conserver les produits agricoles tels que les céréales, les fruits et les légumes dans la plupart des pays en voie de développement.

Un séchage dans des conditions climatiques défavorables entraîne de graves pertes en quantité et en qualité du produit séché. Ces pertes étaient liées à la contamination par la saleté, la poussière et l'infestation d'insectes [1]. Par conséquent, l'introduction des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peut réduire les pertes de récolte et améliorer considérablement la qualité du produit séché par rapport aux méthodes traditionnelles de séchage telles que le séchage direct au soleil ou à l'ombre [2].

Pour tester un séchoir, il est essentiel d'évaluer ses performances complètes et relatives avec les autres séchoirs. Les résultats du test fournissent les informations correspondantes aux chercheurs, aux fabricants et aux utilisateurs finaux. La simulation CFD peut être utilisée pour l'analyse et l'investigation des champs dynamiques, thermiques et la distribution de température et de l'humidité de l'air de séchage, et ce en simulant de manière appropriée les équations d'énergie et de quantité de mouvement, ainsi que les transferts de chaleur et de masse [3].

Selon Zoukit, A., et al.[4], un prototype de séchoir solaire indirect pouvant fonctionner en mode de convection naturelle ou forcée, dans diverses conditions météorologiques, a été modélisé par la méthode de Takagi-Sugeno fuzzy (TSF). L'application de la modélisation TSF aide à l'estimation du comportement du séchoir solaire pour les différentes combinaisons de radiation solaire, de la température ambiante et du débit d'air asséchant. Les comportements prévus sont identiques à ceux expérimentaux avec un RMSE (RMSE%) qui reste inférieur à 0,4C (0,81%) en convection naturelle et à 0,52C (1,94%) en convection forcée. Le modèle TSF développé permet de prédire le comportement thermique dans le séchoir avec précision et dans un délai très court par rapport aux autres techniques de modélisation souvent utilisées.

Un séchoir hybride solaire-biomasse [5] est conçu et construit pour le séchage des feuilles de caoutchouc naturel. Le séchoir comprend une chambre de séchage avec capteur solaire, un échangeur de chaleur et un four à biomasse. La technique CFD à l'aide du logiciel Fluent, est utilisée pour simuler les répartitions de la température et du flux d'air dans une conception innovante de la chambre de séchage. Les résultats de la simulation pour la température sont très proches des valeurs expérimentales en termes de paramètres statistiques. La simulation CFD est effectuée pour la distribution du débit d'air à l'intérieur du séchoir hybride solaire-biomasse afin de garantir l'utilité des ventilateurs à circulation d'air. D'autre part, Sandali et al. [6] ont traité la simulation d'un capteur plan à air utilisé pour le chauffage d'air asséchant dans le but d'étudier le fonctionnement du système sous l'intégration des matériaux à changement de phase permettant de stocker l'énergie solaire pendant la journée pour être utilisée après le coucher de soleil. Les auteurs trouvent que l'intégration d'une couche MCP de 1 cm sous la plaque absorbante augmentait la durée de fonctionnement quotidienne du capteur de 2 heures et améliorait la température de sortie de 10°C après le coucher du soleil. Le MCP avec une température de fusion de 72°C a donné la meilleure température à la sortie du collecteur.

Un autre travail effectué par Sandali et al. [7] concerne une étude expérimentale visant à améliorer les performances thermiques d'un séchoir solaire direct avec intégration d'un échangeur de chaleur à eau géothermique correctement testé dans les régions arides du nord-Sahara, en Algérie. L'échangeur de chaleur génère la chaleur de l'eau chaude en circulation et agit en tant que source de chaleur permanente. De plus, une simulation numérique en 2D a été réalisée et les résultats ont été comparés à ceux de l'expérimental. Les résultats ont montré que l'intégration de l'échangeur de chaleur améliore considérablement les performances du séchoir solaire. Après le coucher du soleil et pendant toute la nuit, la température de l'air de séchage reste importante et presque constante avec une valeur moyenne de 46 °C.

Plusieurs de chercheurs se sont convenu que la simulation numérique a une grande importance dans le développement des séchoirs solaires en plus elle permet d'étudier l'influence de nombreux facteurs avec un coût négligeable par rapports aux expériences réels.

Le présent travail est mené dans le but d'obtenir un modèle numérique CFD validé expérimentalement, décrivant le comportement thermique et dynamique d'un séchoir solaire indirect non ventilé. La simulation numérique a été initialisée par une étude d'indépendance du maillage et ensuite nous avons effectué une comparaison entre des températures mesurées et calculées par le modèle CFD pour une fin de validation.

2. Procédure expérimentale

Nous avons effectué une série d'expériences pour étudier le comportement physique du séchoir solaire à convection naturelle. Le travail expérimental est consacré pour l'étude du séchoir solaire à vide sous les conditions climatiques d'une journée avec ciel clair (jour d'expérimentation 21 /04/ 2019).

Le séchoir étudié est un séchoir solaire indirect non ventilé réalisé antérieurement au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides (L.E.N.R.E.Z.A) de l'université de Ouargla (Algérie).

Le schéma de la **fig. 1** représente la conception générale du séchoir solaire indirect. Le capteur solaire utilisé est un capteur plan à air avec double passage incliné d'un angle de 31° et orienté vers le sud, de longueur de 2 m et de largeur 1 m. Il est constitué d'un absorbeur recouvert en noire mate, un vitrage pour assurer l'effet de serre. Les deux sections de passages sont parallèles avec une épaisseur de 0.06 m. Les côtés latéraux et la partie inférieure sont isolés thermiquement avec du polystyrène.

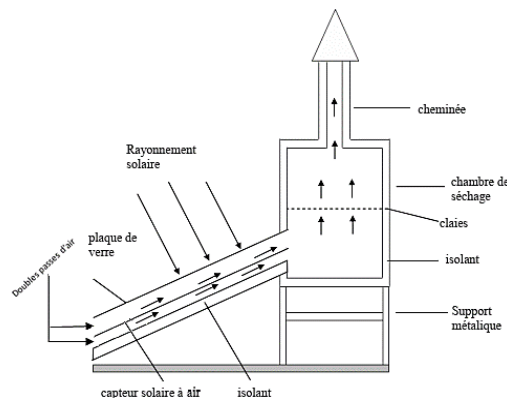


fig. 1 Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à doubles passes.

La chambre de séchage est une boîte galvanisée de forme cubique, de hauteur 0.8 m, de profondeur de 0,8 m ; les parois de la chambre sont isolées thermiquement par du polystyrène. La chambre de séchage est munie d'une cheminée cubique, isolée aussi, de hauteur 1 m. les produits sont déposés à l'intérieur de chambre sur des claies en grillage.

Le rayonnement solaire global reçu par le capteur plan est mesuré à l'aide d'un solarimètre de type (Mod.DS 120). Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique.

Nous avons utilisé l'Appareil multifonction Mesure Physique C.A 1051 avec un anémomètre à fil chaud pour mesurer la vitesse d'écoulement à l'entrée du capteur et aussi à l'entrée et la sortie de la cheminée. Quinze thermocouples de type K ont été utilisées pour mesurer la température en plusieurs endroits du séchoir solaire (capteur, chambre de séchage et cheminée) comme c'est illustré sur la figure 2. Des thermocouples ont été fixés sur la ligne médiane de la surface de l'absorbeur, de la surface interne du verre et de la lame d'air. Les thermocouples ont été connectés avec un système d'acquisition (NI cDAQ -9174) avec le module NI 921

3. Modélisation numérique

Dans cette partie nous allons présenter le modèle physique adopté pour les différentes simulations. Il s'agit d'un séchoir solaire indirect dont nous étudierons l'homogénéité de son champs thermique et la variation de son champs dynamique. La configuration géométrique du séchoir ainsi que les conditions aux limites adoptées seront exposées dans cette partie.

La résolution d'un problème physique par les outils CFD passe généralement par des étapes communes dans la majorité des logiciels (Fluent, CFX ...). Le diagramme suivant (**fig. 2**) résume les principales étapes de modélisation et simulation CFD groupé en trois grandes parties (pré-traitement, traitement et Post-traitement)

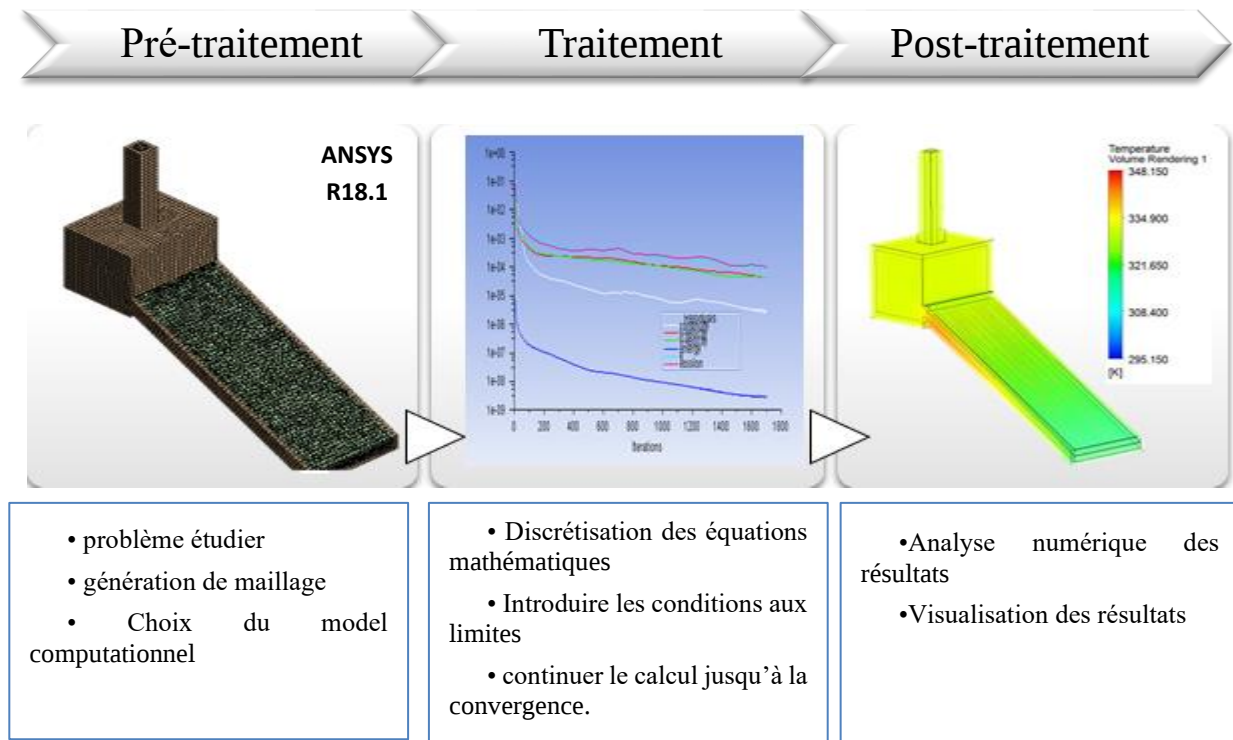


fig. 2 étapes principales d'un projet CFD.

3.1 Conditions aux limites

Les transferts de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement ont été modélisés sur toutes les surfaces chauffées. Les températures mesurées de l'absorbeur et du vitrage, sont introduites en ANSYS Fluent comme valeurs fixées. Les parois extérieures ont été maintenues en convection avec l'air extérieur en calculant le coefficient de transfert de chaleur par la relation (1) [8]. Les conditions ambiantes aux limites extérieures ont été représentées à l'aide des valeurs mesurées de température et de vitesse d'entrée, tandis qu'à la sortie la condition supposée est la pression de sortie égale à 1 atm, comme montré sur **la figure 3**. De plus, l'accélération de la gravité était prise en compte ; sa valeur a été fixée à 9,81 m.s⁻². À l'entrée du capteur la condition est la vitesse de l'air et sa température telles que obtenues expérimentalement.

$$h_w = 5.7 + 3.8 V \quad (1)$$

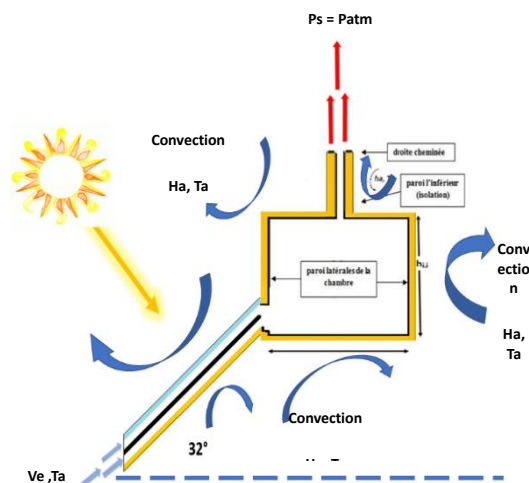


fig. 3 Schéma des conditions aux limites.

4. Résultats et discussions

L'ensemble de ces valeurs simulées et calculées sont présentées sur la **figure 4**. On peut remarquer, tenant compte du phénomène étudié, que les valeurs calculées et mesurées sont en bonne cohérence avec un écart maximal de presque 4°C. Cet écart observé peut être expliqué par la différence entre les conditions climatiques réelles (fluctuations du rayonnement solaire et de la vitesse du vent dans la journée) et celles utilisées par le logiciel de calcul, basées sur une évolution typique régulière.

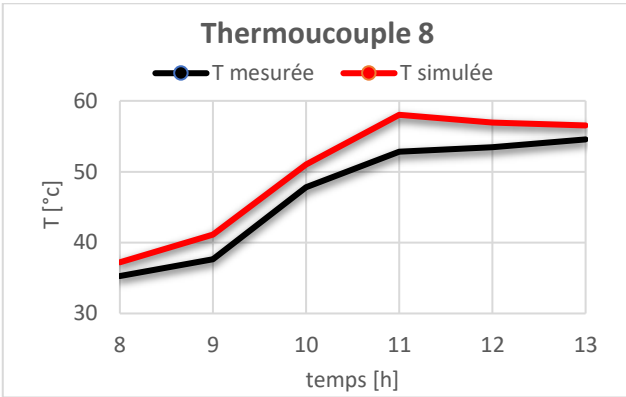


fig. 4 Comparaison entre la température de sortie du capteur solaire, simulée et mesurée

La Fig. 5 représente la distrubition de la vitesse et la temperature dans le séchoir simulé.

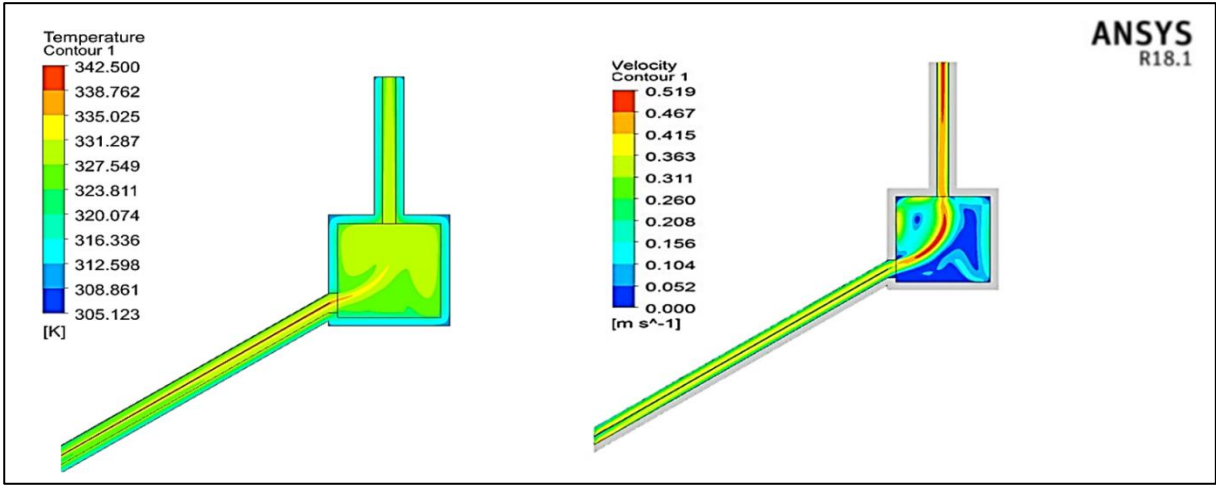


Fig. 5 la distribution de la température et les vitesses du séchoir a l'état réel

4.1 La conception optimale du séchoir solaire indirect

Après les résultats extraits par la MPE et après avoir lié les probabilités des facteurs pour la meilleure valeur des réponses souhaitées, nous avons trouvé trois formes qui apportaient une amélioration par rapport à la forme réelle du séchoir solaire indirect fabriqué par le laboratoire de (L.E.N.R.E.Z.A). Afin de vérifier l'étendue d'amélioration ; trois réponses ont été choisies. La première est la vitesse à la sortie puisqu'elle affecte directement la durée du séchage où le deuxième paramètre est l'écart type de température à la chambre de séchage, ce qui conduit à une plus grande homogénéité de la répartition de la température de séchage pour sa valeur minimale. Ainsi que l'augmentation relative de la température moyenne (troisième réponse) dans la chambre de séchage qui affecte positivement l'opération de séchage. Ceci est expliqué par les deux tableaux suivants **Tableau 1** et

Tableau 2 suivants :

Tableau 1 Facteurs optimaux par rapport aux facteurs de la conception réel.

Paramètre de géométrie	Conception réel de laboratoire	Candidate N° 1	Candidate N° 2	Candidate N° 3
La lame d'air (m)	0,085	0.05	0.05	0.05
Hauteur de la cheminée (m)	1.00	0.2	0.3	0.4
Angle d'inclinaison (°)	90	52	52	45
Position de la cheminée	Centre	Centre	Centre	Centre
Forme de la chambre de séchage	Rectangle	Forme coudé 45°	Forme coudé 45	Forme coudé 45°

Tableau 2 Réponses optimaux par rapport aux réponses de la conception réel.

Réponses	Conceptions	Candidat réel de laboratoire	Candidat N°1	Candidat N°2	Candidat N°3
Ecart type (facteur d'homogénéité)		2.74	2.37	2.51	2.48
Température moyenne (c°)		51.37	51.81	51.73	52.39
Vitesse sortie (m/s)		0.38	0.660	0.661	0.66

4.2 Simulation des conceptions optimales

Les conceptions optimales obtenus par la méthode des plans d'expériences ont été simulé avec fluent pour valider les résultats d'optimisation avec le l'outil CFD. Les résultats de la simulation ont présenté dans les figures suivantes

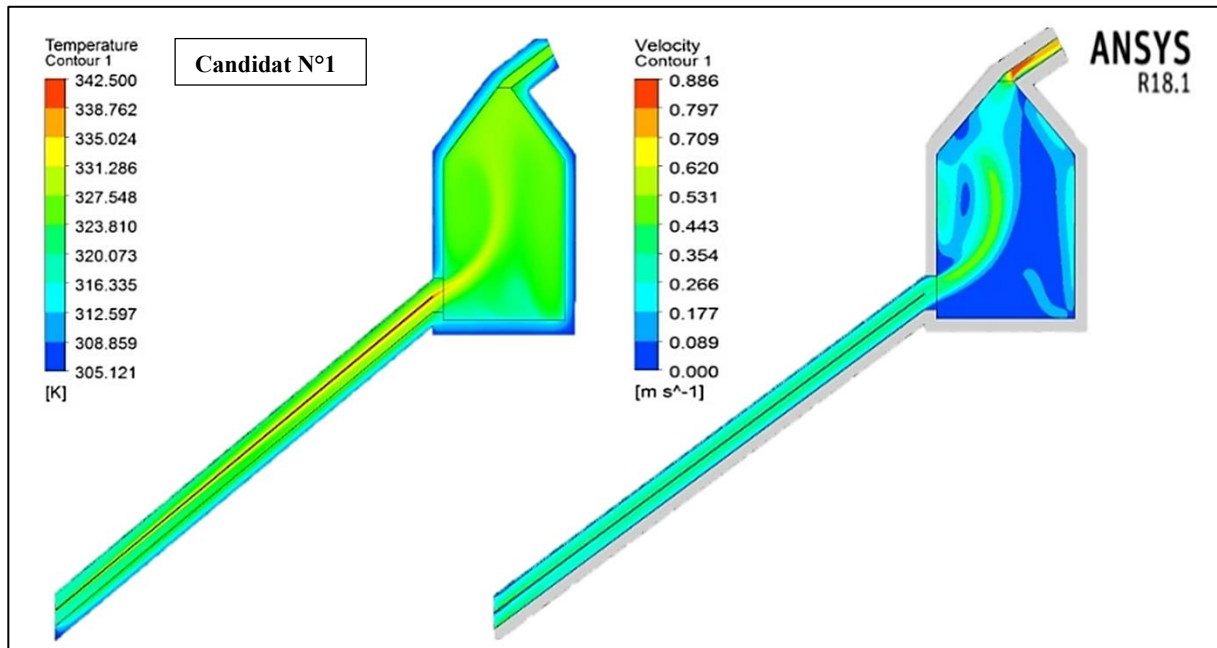


Fig. 6 Distribution de la température et champs des vitesse dans conception optimale N°1.

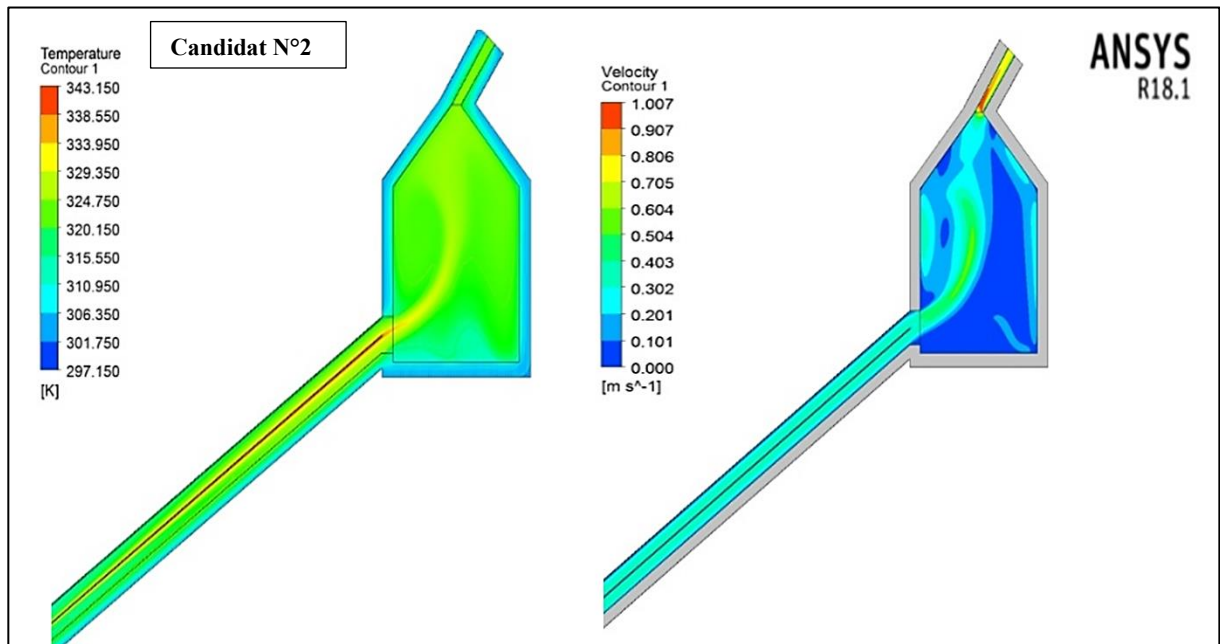


Fig. 7 Distribution de la température et champs des vitesses dans conception optimale N°2.

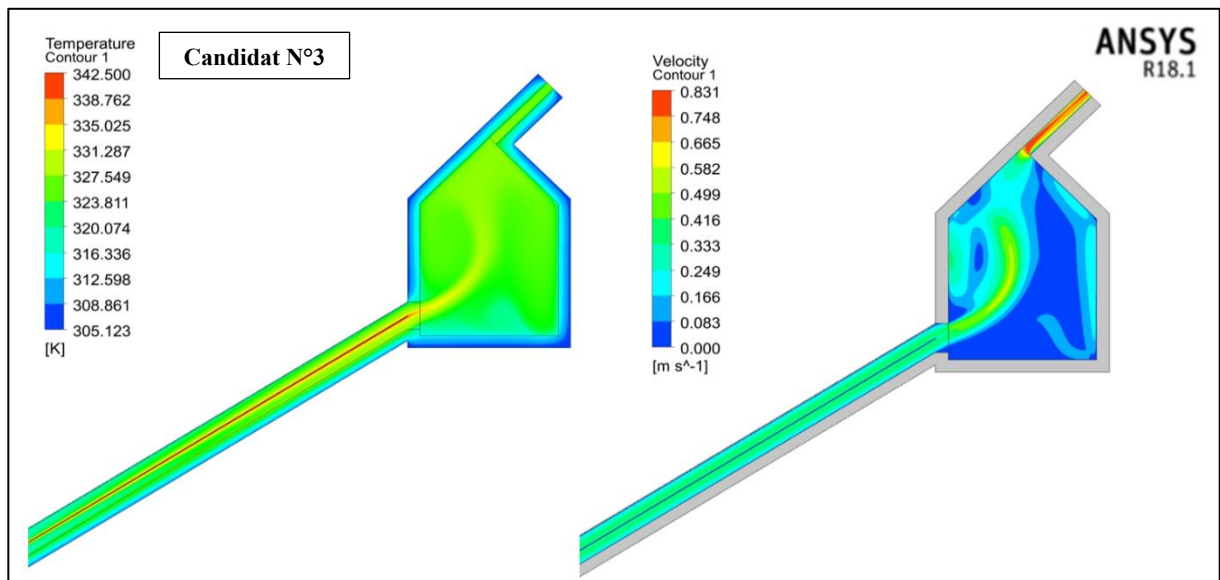


Fig. 8 Distribution de la température et champs des vitesses dans la conception optimale N°3.

Les **figs. 5-7** représentent la distribution de la température et la vitesse des conceptions optimales trouvées. Dans ces figures il est clairement illustré la différence de distribution et la valeur de la vitesse comparativement avec l'état réel (**fig. 8**) et on remarque que les courbes ont des valeurs proches. Nous notons également que la conception N°3 à une température plus élevée par rapport aux autres conceptions N°1, N°2.

5. Conclusion

Un processus de couplage entre la méthode des plans d'expérience et un modèle numérique bidimensionnel (utilisant la méthode des volumes finies) a été développé puis utilisé pour l'optimisation d'un séchoir solaire indirect.

Dans l'objectif de valider la simulation CFD nous avons d'abord commencé par des mesures expérimentales sur un séchoir solaire indirect, exploré à vide, réalisé au laboratoire LENREZA à l'université de Ouargla dans le cadre de travaux antérieurs.

Suite au processus d'optimisation développé sur le code JMP, le résultat final obtenu pour les conditions optimales permettant de maximiser la température moyenne et la vitesse à la sortie de la cheminée est tel que : la lame d'air 0,05m ; la hauteur de la cheminée 0,2 m ; l'angle d'inclinaison de la cheminée 52° avec une cheminée positionnée au centre et une chambre de séchage coudée 45°.

Les résultats de simulation du séchoir optimal ont montré une amélioration relative de la vitesse à la sortie qui a atteint 0,66 m/s avec écart type de température de 2.37 et une élévation relative de la température moyenne de séchage de 52.39

°C. Notons ici que les résultats des tests précédemment effectués dans le laboratoire LENREZA pour l'état réel du séchoir, donnaient une vitesse de sortie de 0.38m/s, un écart type de 2,74 et une température moyenne de 51.37°C.

6. Références

- [1] D. R. Pangavhane, R. Sawhney, and P. J. E. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer," vol. 27, no. 6, pp. 579-590, 2002.
- [2] O. Yaldiz, C. Ertekin, and H. I. J. E. Uzun, "Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes," vol. 26, no. 5, pp. 457-465, 2001.
- [3] P. Singh Chauhan, A. Kumar, and P. Tekasakul, "Applications of software in solar drying systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1326-1337, 2015.
- [4] A. Zoukit, H. El Ferouali, I. Salhi, S. Doubabi, and N. Abdenouri, "Takagi Sugeno fuzzy modeling applied to an indirect solar dryer operated in both natural and forced convection," *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 849-860, 2019.
- [5] S. Sonthikun, P. Chairat, K. Fardsin, P. Kirirat, A. Kumar, and P. Tekasakul, "Computational fluid dynamic analysis of innovative design of solar-biomass hybrid dryer: An experimental validation," *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 185-191, 2016.
- [6] M. Sandali, A. Boubekri, A. Benhamza, B. Settou, h. Daoud, and D. Mennouche, "A simulation study of a solar collector using phase change materials for air heating application needs," vol. 1814, no. 1, p. 020010: American Institute of Physics.
- [7] M. Sandali, A. Boubekri, D. Mennouche, and N. Gherraf, "Improvement of a direct solar dryer performance using a geothermal water heat exchanger as supplementary energetic supply. An experimental investigation and simulation study," *Renewable Energy*, vol. 135, pp. 186-196, 2019.
- [8] K. S. Ong, "A mathematical model of a solar chimney," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 7, pp. 1047-1060, 2003/06/01/ 2003.