

Comportement thermique du canal d'un séchoir solaire longitudinal

S. KHERROUR¹, A. BOUHJAR², A. BOUALIT¹ et K. KACI²

1 Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa.

2 Centre de Développement des Energies Renouvelables, Alger.

s_kherrou@yahoo.fr, bouhdjar@cder.dz, hboualit@uraer.dz, kkaci2001@yahoo.fr

Résumé : L'objectif de ce travail consiste en l'étude de l'effet de la régulation par ventilation et par injection de l'air frais ou chaud sur le comportement thermique du canal d'un séchoir solaire longitudinal. Le rayonnement incident sur la paroi supérieure du séchoir augmente provoquant ainsi une élévation très importante de la température de l'air à l'intérieur du séchoir. Ceci peut influencer négativement sur le produit à sécher.

Afin de bénéficier de l'énergie solaire, lors de l'absence du rayonnement solaire, un système de stockage thermique peut être éventuellement associé à notre système pour compenser cette insuffisance et assurer la continuité du processus de séchage.

Pour cela un modèle mathématique a été développé en se basant sur la méthode des éléments finis pour évaluer le comportement thermique le long du séchoir pendant toute la période d'ensoleillement.

Les résultats de la régulation illustrés dans les différentes figures montrent le maintien d'un profil de température dans une plage de valeurs limitées. Donc la régulation nous a permis d'intercepter la variation des températures le long du séchoir solaire, pendant toute la période de son fonctionnement, dans un intervalle qui favorise le processus du séchage des produits bien déterminés.

Mots clés : séchage solaire; méthode des éléments finis; Reynolds; champ de température; champ de vitesse

1. Introduction :

Dans les pays en voie de développement, dont le degré d'ensoleillement est considéré très important tout au long de l'année, le séchage par le biais de l'énergie solaire est une alternative raisonnable. Mais la variation de l'intensité du rayonnement solaire et la discontinuité du fonctionnement des séchoirs solaires présente l'inconvénient majeur d'entraîner un coût énergétique supplémentaire le long de la période du séchage.

Pour exprimer le phénomène de transfert de chaleur dans le canal du séchage afin de pouvoir remédier au problème traité et bénéficier de toute la période de l'ensoleillement de la journée, nous avons opté à réaliser une étude sur un séchoir solaire longitudinal. Le séchoir étudié entre dans la catégorie des séchoirs solaires indirects à convection forcée. C'est un capteur à air de longueur de huit mètres constitué d'un vitrage et un absorbeur montés sur une surface isolante. L'air passe entre l'absorbeur et la surface isolante.

Le système contient trois points d'injection à travers la plaque absorbante par lesquels le contrôle de la température de l'air est assuré en injectant de l'air frais ou chaud.

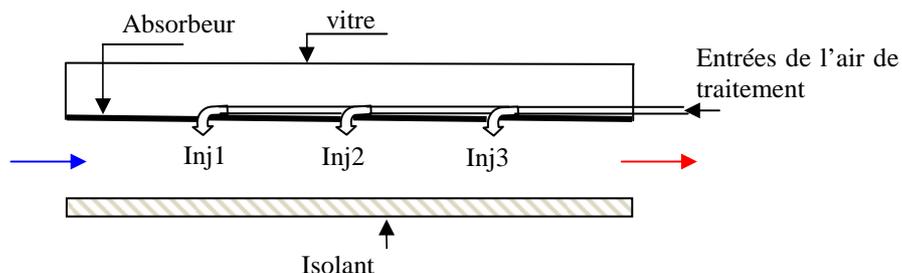


Figure 1: Séchoir solaire longitudinal.

2. Modèle mathématique:

2.1. Conditions aux limites :

Dans ce travail, on a considéré des conditions aux limites spécifiques et représentatives de l'aspect physique considéré.

Pour l'analyse de l'établissement d'un régime hydrodynamique, on a imposé :

- Une condition de non glissement aux parois solides ;
- Vitesse constante à l'entrée ;
- Profil de vitesse établi à la sortie pour éviter les perturbations du calcul.

Tandis que pour l'établissement d'un régime thermique, on a considéré :

- Un flux variable à la paroi solide et cette variation est spatiotemporelle ;
- Température constante à l'entrée ;
- Profil de température établi à la sortie.

2.2. Formulation adimensionnelle :

En guise de généralisation, les équations de la quantité de mouvement et de continuité sont ramenées à une forme adimensionnelle en considérant les échelles de longueur (R), de vitesse (U_m)(vitesse moyenne débitante à l'entrée) et de température $\Delta T = (T_p - T_e)$ ou bien qR/K suivant le cas traité.

Les équations gouvernant le problème s'écrivent alors :

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (1)$$

$$Re \left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) = -\frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(2 \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*} + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) \quad (2)$$

$$Re \left(u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) = -\frac{\partial P^*}{\partial y^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*} + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(2 \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) \quad (3)$$

$$Pe \left(u^* \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} \right) = \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} \right) \right\} \quad (4)$$

Les variables adimensionnelles associées sont :

$$u^* = \frac{u}{u_m}, v^* = \frac{v}{v_m}, x^* = \frac{x}{H}, y^* = \frac{y}{H}$$

$$\text{Pression adimensionnelle : } P^* = P / \left(\mu \frac{u_m}{H} \right), \quad \text{Température adimensionnelle: } \theta = (T - T_e) / \left(q_{ref} \frac{R}{K} \right)$$

$$\text{Nombre de Prandtl : } Pr = \frac{c_p \mu}{K}, \quad \text{Nombre de Reynolds : } Re = \frac{\rho u_m H}{\mu}$$

$$\text{Nombre de Peclet : } Pe = Pr Re = \frac{u_m H}{K}$$

2.3. Méthode numérique :

Plusieurs méthodes numériques offrent la possibilité de résoudre le système d'équations aux dérivées partielles. Ces méthodes sont : méthode des différences finies [1-5], des volumes finis [6,7], des éléments finis [8-12]... , permettent la transformation du système d'EDP ou de sa forme intégrale en un système d'équations algébriques, dont la résolution aboutit à une reconstruction de la forme de la solution.

Dans notre travail, on a adopté la méthode aux éléments finis qui se résume aux étapes suivantes :

- Subdivision du domaine physique en un nombre d'éléments ;

- Réécriture du système d'EDP sous une forme intégrale par l'introduction de la méthode des résidus pondérés ;
- Approximation simple des variables inconnues à fin de permettre le passage du système d'EDP mis sous forme intégrale à un système d'équations algébriques ;
- Résolution numérique du système d'équations algébriques.

3. Interprétation des résultats :

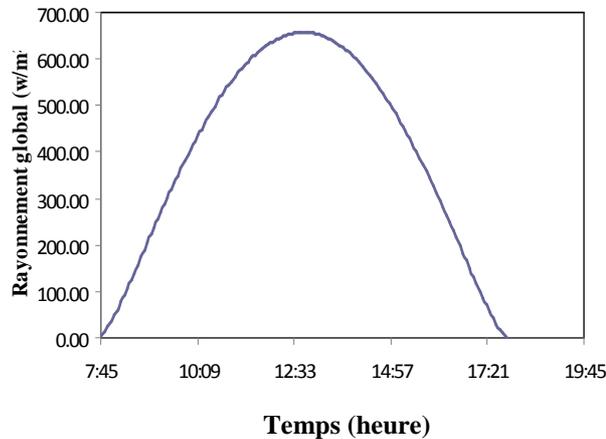


Figure 2: Variation du rayonnement global sur un plan horizontal à Ghardaïa le 08 janvier 2012.

La figure 2 montre l'évolution de l'ensoleillement mesuré à Ghardaïa le 08 janv2012. Ces valeurs sont obtenues à partir d'une station météorologique appelée SunTracker de grande précision [13].

L'interprétation des résultats sera répartie en quatre périodes selon l'intensité du rayonnement solaire incident sur la surface du séchoir, le début d'ensoleillement, la courbe ascendante jusqu'à la valeur maximum qui atteint les 650 w/m², la courbe descendante et la fin de la journée.

Selon la variation de l'intensité du rayonnement solaire incident sur l'absorbeur du séchoir, le profil de température en question est maintenu par une combinaison de différents modes de régulation qui sont:

- Augmentation ou réduction du débit de ventilation à l'entrée du séchoir.
- Chauffage de l'air de ventilation.
- Introduction de l'air chaud par des injections localisées au niveau de l'absorbeur.
- Introduction de l'air frais par les mêmes points d'injection.
- Variation du débit des injections.

L'analyse temporelle de l'effet du rayonnement solaire sur l'évolution de la température de séchage pour deux valeurs extrêmes admissibles de débit de ventilation ($Re_{min}=25$ et $Re_{max}=85$), nous a permis, selon le comportement du champ thermique, de subdiviser le temps d'ensoleillement en intervalles et d'adopter à chacun d'entre eux un scénario de régulation approprié. Dans ce qui suit, nous détaillons chaque intervalle spécifié.

Il est à remarque que, pour toutes les figures, les courbes continues représentent les évolutions de température avec régulation et les courbes discontinues représentent les évolutions de température sans régulation.

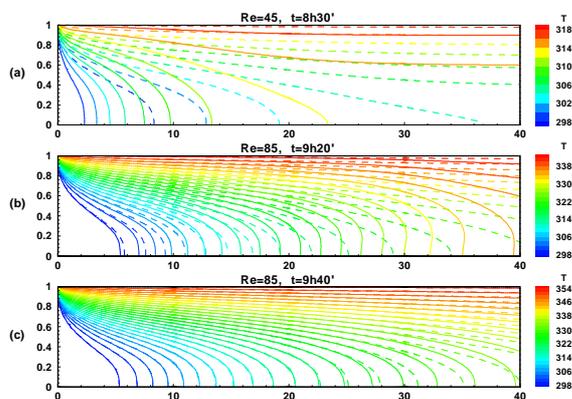


Figure 3 : Champ de Température dans le séchoir (les isothermes dans le canal avec et sans régulation)

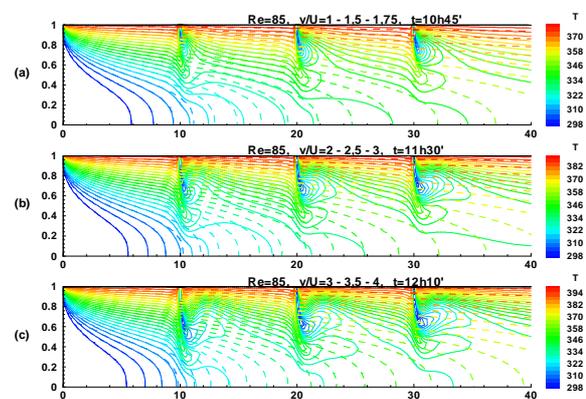


Figure 4 : Profil des températures dans le séchoir (les isothermes dans le canal avec et sans régulation)

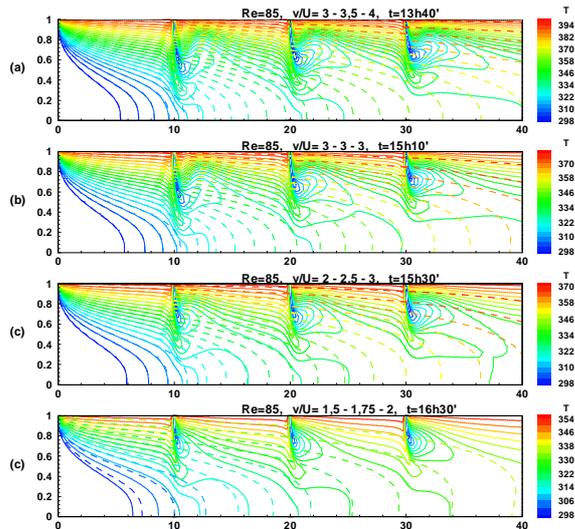


Figure 5 : Profil des températures dans le séchoir (les isothermes dans le canal avec et sans régulation)

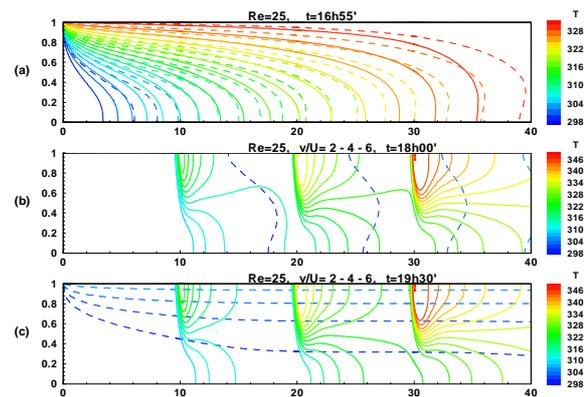


Figure 6 : Profil des Températures dans le séchoir (les isothermes dans le canal avec et sans régulation)

3.1. Début d'ensoleillement (7h50') jusqu'à 9h50'.

Cette période de la journée est caractérisée par un faible rayonnement, insuffisant à un amorçage rapide du processus de séchage.

- Pour des valeurs de Reynolds inférieures à 25, nous sommes en présence d'un écoulement plutôt lent où la conduction prime sur le transfert de chaleur. Le champ thermique atteint des valeurs de température très importantes, supérieures même aux valeurs souhaitées.
- Pour des valeurs de Reynolds supérieures à 85, l'air est à évacuer rapidement par convection, ce qui empêche l'augmentation de la température.

A la base de ces deux cas de figures, nous avons adopté une régulation qui consiste à augmenter graduellement la vitesse de ventilation de $Re=25$ à 85 , chose qui nous a permis d'avoir un profil de températures favorable au séchage et de le maintenir ainsi pendant un intervalle de temps compris entre le début d'ensoleillement et 9h20'.

Les figures : 3-a et 3-b illustrent la configuration du champ thermique avec et sans régulation pour deux instants distincts. Pour la période allant de 9h20' à 9h50', le nombre de Reynolds est maintenu à 85, ce qui induit une variation minimale dans le champ thermique. Ce constat est clairement montré par la figure 3-c.

3.2. De 09h50 jusqu'à 12h10.

Avec le temps, le rayonnement incident sur la paroi supérieure du séchoir augmente provoquant ainsi une élévation très importante de la température de l'air à l'intérieur du séchoir. Ceci peut influencer négativement sur le produit à sécher. Cette situation est représentée par la figure 4 qui schématise la structure du champ thermique pour différents instants. La nécessité d'avoir un profil de température dans une plage de valeurs limitées nous a contraint d'atténuer cette élévation par injection d'air frais (à une température de 298 K).

3.3. De 12h10' jusqu'à 16h30'.

Le même travail a été effectué pour cette période de temps. Cette durée d'exploitation est caractérisée par la diminution du rayonnement incident sur l'absorbeur du séchoir solaire. En absence d'injection de l'air frais, la température à la sortie du capteur s'est abaissée de 370 K à 338 K en espace de 3 heures. Malgré ce fait, les profils de températures obtenus se situent hors la gamme désirée de température répondant aux exigences du séchage. Cependant l'influence de l'air frais injecté est remarquable sur le développement du champ thermique (Figure 5). Cela est caractérisé par des vitesses d'injection dont les valeurs diminuent en évoluant dans le temps.

3.4. De 16h30' jusqu'au début de la deuxième journée ou la fin du processus.

A partir de 16h30', le rayonnement solaire s'affaiblit à un point qui rend impératif l'arrêt du processus d'injection et la réduction du débit de ventilation de $Re=85$ à 25 . Cette manipulation a permis de maintenir l'évolution du profil de température dans la fourchette voulue pendant 20 minutes (Figure 6-a).

Pour assurer la continuité du processus de séchage durant la nuit, nous avons procédé d'un coté par le chauffage à 308 K de l'air destiné à la ventilation à l'entrée du capteur, et d'un autre coté, par l'injection de l'air chaud à des températures et emplacements différents pour reconstituer des profils favorables au procédé de séchage (Figure 6-b et 6-c)..

Conclusion

Nous avons développé un modèle d'un séchoir solaire, qui peut répondre à nos objectifs pour garantir une continuité au processus du séchage. Dans ce contexte nous avons proposé une série de méthodes de régulation selon l'intensité du rayonnement solaire:

Au début de la journée, nous avons procédé à varier le débit de ventilation à l'entrée du capteur de $Re=25$ à $Re=85$. Ce qui nous a permis d'avoir des températures acceptables dans un court intervalle de temps puis nous avons fixé la ventilation à $Re=85$ pendant une courte durée ce qui nous a économiser de l'énergie.

Ensuite, quand le rayonnement devient plus important, un refroidissement par injection de l'air frais est imposé pendant toute la période avec une variation au niveau du débit des injections de sorte qu'elle soit ascendante pour des valeurs inférieures à la valeur maximale du flux incident sur l'absorbeur et descendante pour des valeurs supérieures à la même valeur.

Lorsque le rayonnement diminue, le processus du séchage risque d'être stoppé, pour cela un changement de méthode de régulation est nécessaire. A ce moment on a refait inversement la régulation faite au début de la journée, avec une diminution graduelle du débit de ventilation de $Re=85$ à $Re=25$.

Nomenclature

Symboles	Désignations	Symboles Grecs	
H	Longueur caractéristique du domaine physique, m	θ	Température adimensionnelle
K	Diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$	μ	Viscosité dynamiques, $Pa.s$
P	Pression, pa	ρ	La densité, $Kg.m^{-3}$
q	Flux de chaleur, $W.m^{-2}$		
R	Longueur caractéristique du domaine physique, m		Indices
T	Température, $^{\circ}C$	e	Entrée
t	Temps, s	p	Parois
u	Vitesse longitudinale, $m.s^{-1}$	m	Moyenne
v	Vitesse transversal, $m.s^{-1}$		
x	Coordonnée longitudinal, m		
y	Coordonnée transversale, m		

Références

- [1] G.E. Forsythe, W.R. Wasow, Finite difference methods for partial differential equations, *John Wiley and Sons, New York*, 1960.
- [2] M. N. Ozisik, Finite Difference Methods in Heat Transfer, *CRC Press, Boca Raton, FL*, 1994.
- [3] R.D. Richtmyer, K.W. Morton, Difference methods for initial value problems, *Wiley, New York*, 1967.
- [4] G.D. Smith, Numerical solution of partial differential equations finite difference methods, *3rd edn, Clarendon Press, Oxford*, 1985.
- [5] J.C. Strikwerda, Finite difference methods for the incompressible Navier-Stokes equations – A survey, *MRC Tech. Summary Rept. 2584, Math. Res. Ctr, University of Wisconsin*, 1983.
- [6] S.V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, *McGraw-Hill, New York*, 1980.
- [7] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, *Addison-Wesley*, 1996.
- [8] A.J. Baker, Finite element computational fluid mechanics, *McGraw-Hill, New York*, 1983.
- [9] T.J. Chung, Finite element analysis in fluid dynamics, *McGraw-Hill, New York*, 1978.
- [10] G. Comini, S. Del Guidice, C. Nonino, Finite Element Analysis in Heat Transfer, *Taylor & Francis, Washington, DC*, 1994.
- [11] V. Girault, P.-A. Raviart, Finite element methods for Navier-stokes equations, *Springer, Berlin*, 1986.
- [12] O.C. Zienkiewicz, The finite element method, *McGraw-Hill, New York*, 1977.
- [13] K. Gairaa, S. Benkacali, Modélisation numérique des irradiations globale et diffuse au site de Ghardaïa, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°1, p 129 – 136, 2008.