

## Effet de la cheminée sur le rendement d'un séchoir solaire

Hakim SEMAI, Sofiane El MOKRETAR & Amor BOUHDJAR

*Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER  
BP 62 Route de l'Observatoire Bouzaréah, 16340 Alger, Algérie*

*[h.semai@cder.dz](mailto:h.semai@cder.dz)  
[s.elmokretar@cder.dz](mailto:s.elmokretar@cder.dz)  
[a.bouhdjar@cder.dz](mailto:a.bouhdjar@cder.dz)*

**Résumé:** Le travail réalisé est basé sur une étude comparative entre deux séchoirs solaire. Le premier séchoir est un séchoir standard qui nous sert de modèle témoin, le deuxième séchoir est celui sur lequel on opère quelques modifications sur sa forme géométrique afin d'évaluer leurs impacts sur le rendement énergétique. Une première modification consiste à décaler la cheminée vers le centre du vitrage. La deuxième modification est de ramener l'entrée de la cheminée vers la surface de la claie, ainsi on aura une cheminée d'une forme comparable à celle d'une hotte. La simulation est réalisée à l'aide d'un code CFD, qui porte sur une journée type avec des conditions météorologiques à savoir le rayonnement solaire et la température ambiante qui évoluent le long de ladite journée. Le séchoir en question fonctionnera à vide, sans présence du produit à sécher. Les parois de la cheminée sont considérées semi transparentes afin d'éviter l'effet de l'ombre sur la surface de captation. Les modifications apportées au séchoir nous ont permis d'améliorer le rendement énergétique dudit séchoir.

**Mots clés :** séchoir solaire, capteur solaire, stockage thermique, écoulement turbulent, écoulement transitoire.

### 1. Introduction :

Les séchoirs solaires représentent l'une des technologies utilisées dans le domaine des énergies renouvelables afin d'en tirer profit de l'énergie fournie par le rayonnement solaire, qui est une énergie gratuite, propre et renouvelable. L'énergie collectée dans ces séchoirs aura pour utilité de sécher des produits, de familles différentes, destinés à la conservation. Plusieurs études ont été réalisées dans le domaine de séchage et en particulier le séchage solaire. Des études à caractères expérimentales et théoriques ont permis l'amélioration des techniques utilisées dans le séchage solaire et précisément le rendement desdits séchoirs. Le design et les pièces du séchoir solaire dépendent de la quantité, du type et de la classification du produit ou du matériel à sécher. La recherche au cours des 30 dernières années a permis de mettre l'accent sur les conditions qui contribuent à améliorer le processus de séchage en augmentant par exemple la quantité d'énergie solaire récupérée grâce à l'effet de serre ou en améliorant l'écoulement et donc le transport d'énergie par l'air de séchage notamment en accentuant l'effet de cheminée par exemple pour le séchage par convection naturelle. Notre travail s'inscrit dans cette dernière optique, c'est-à-dire, accentuer l'effet de la cheminée pour améliorer le transport d'énergie et ce dans le cas d'un séchage par convection naturelle.

Semai Hakim & al. [1] ont étudié l'effet de l'écoulement du vent sur le rendement énergétique d'un séchoir solaire, tout en adoptant différentes formes géométriques sur ledit séchoir. En diminuant le rapport de la largeur sur l'épaisseur du capteur et en mettant en place un système de rebord en avant de la surface de la vitre on diminuerait les pertes vers l'extérieur du capteur.

Turhan. Koyuncu [2], a étudié expérimentalement l'influence du nombre de couvertures et il a trouvé que ce facteur influe fortement sur l'efficacité du capteur.

S.Youcef-Ali [3] a montré dans une étude expérimentale que la couverture triple donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce à la minimisation des pertes vers l'extérieur.

Donatien Njomo [4] a souligné d'après une étude numérique, qu'un capteur avec double couverture de matière différente (ici la couverture extérieure est en plexiglas et celle intérieure est en verre) a des performances meilleures qu'un capteur à deux vitres de même matière.

Sachant que, la turbulence renforce davantage le phénomène de transfert de chaleur qui s'effectue entre le produit à sécher et le fluide caloporteur, une possibilité peut se présenter à nous, qui fait l'objet de notre travail, pour accentuer le phénomène de turbulence au niveau de la surface d'échange. La cheminée utilisée dans les séchoirs solaires sert de système d'évacuation au fluide caloporteur, qui s'écoule d'un mouvement ascendant dans la veine d'essai, favorisé principalement par la convection naturelle. L'entrée de la cheminée dans un capteur classique se trouve au niveau supérieur de l'enceinte de séchage, loin de l'emplacement de la claie de séchage. Dans notre cas, l'entrée de la cheminée se trouvera juste au-dessus de la claie de séchage. Cette configuration nous permettra d'accélérer l'évacuation de la masse d'air, qui se trouve en contact avec le produit à sécher et qui

représente la masse d'air avec un taux d'humidité élevé dans le séchoir. Le renouvellement de l'air, peu chargée en humidité avec une capacité d'absorption élevée, s'effectuera d'une manière permanente et avec des fréquences réduites. Du coup, le temps de séchage sera réduit, les pertes vers l'extérieur du capteur, qui se font au niveau du vitrage, seront réduites et ce dernier, revient au fait que le gradient de température entre la vitre et le milieu ambiant reste relativement faible du moment qu'il n'y a pas d'évacuation des masses d'air les plus chaudes qui se trouvent au voisinage de la vitre. Cependant, une autre configuration est prise en considération et qui consiste à décaler l'emplacement de la cheminée vers le centre du vitrage. Ainsi, les phénomènes sus-cités auront pour effet une amélioration assez notable du rendement dudit séchoir.

## 2. Domaine de simulation

Le domaine de simulation est limité par l'enveloppe du séchoir, la surface du sol, une entrée et une sortie du domaine qui sont pris loin de l'emplacement du séchoir. On impose à l'entrée du domaine une vitesse d'entrée de l'air considérée comme étant la vitesse du vent avec une température qui équivaut à celle de l'ambiante. A la sortie du domaine on impose une condition de type « OUT FLOW ». Les parois semi transparentes sont dotées d'un coefficient d'absorbance d'une valeur de 0.64. Les parois latérales et la paroi inférieure du séchoir sont supposées adiabatiques. La figure (1) représente le capteur classique qui nous sert de capteur témoin, la figure (2) représente le capteur dotée d'une cheminée qui se trouve décalée vers le centre du vitrage, la figure (3) représente le capteur d'une forme identique à celle du capteur 2 sauf que l'entrée de la cheminée se situe à une distance de 10cm de la claie de séchage avec une forme comparable à celle d'une hotte. A l'entrée du domaine nous imposons une condition d'entrée définie par la vitesse de l'écoulement du vent et une température d'entrée définie par la température ambiante. Dans notre étude, nous exploitons une caractéristique climatique régionale (région de Tizi-Ouzou).

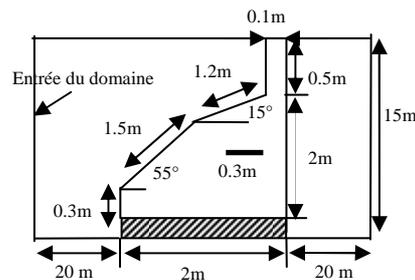


Figure 1: Séchoir témoin

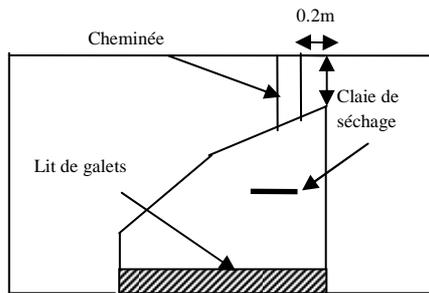


Figure 3 : Séchoir avec une cheminée décalée de 20 cm vers le centre du vitrage.

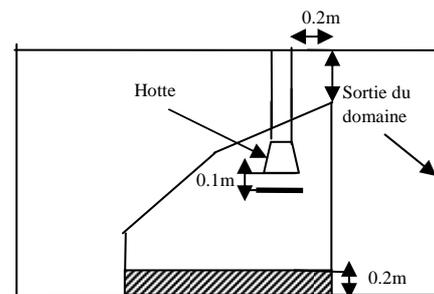


Figure 2 : Séchoir avec une cheminée décalée de 20 cm vers le centre du vitrage (forme de hotte).

Dans l'étude expérimentale des caractéristiques de l'écoulement du vent [5] le profil de vitesse adopté est un profil logarithmique. Dans la formulation de Prandtl, dans laquelle il introduit la longueur moyenne de mélange  $l_m$ , le flux vertical de quantité de mouvement est égal, à tout instant, à :

$$\rho \cdot \overline{u'w'} = -\rho \cdot l_m^2 \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (1)$$

Prandtl suppose que la densité de flux de quantité de mouvement est constante dans tout l'écoulement. Celle-ci est équivalente à la contrainte de cisaillement  $\tau$  ( $kg m^{-1} s^{-2}$ ) et si on appelle  $\tau_0$  la contrainte de

cisaillement au niveau du sol ou contrainte pariétale (force d'entraînement exercée par le vent sur la surface du sol, égale et opposée à la force de freinage exercée par la surface) on a :

$$\tau_0 = \tau = -\rho \cdot \overline{u'w'} \quad (2)$$

On pose alors :  $u^* = \sqrt{\tau_0/\rho}$  appelée aussi vitesse de frottement et  $l_m = k \cdot z$  (3)

En combinant ces équations (1, 2 et 3) on obtient l'équation différentielle du profil vertical du vent :

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u^*}{k \cdot z} \quad (4)$$

L'intégration de cette dernière équation nous donne le profil logarithmique de vitesse du vent dans une

couche limite turbulente :  $u(z) = \frac{u^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$  (5)

$u^* = \sqrt{\tau/\rho}$  : Vitesse de frottement,  $z_0$  : Paramètre de rugosité,  $\kappa=0.41$  : Constante de Van Karman.

Pour une température de 15°C  $\rho_{\text{air}} = 1.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , Haxaire a trouvé une contrainte pariétale :

$$\tau_0 = \rho \cdot \overline{u' \cdot w'} = 0.0411 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$u^* = 0.183 \text{ m/s}$$

Une régression linéaire et une identification de  $z_0$  par la méthode des moindres carrés a permis d'obtenir le paramètre de rugosité du sol :  $z_0 = 0.2158 \text{ m}$  [6]. Enfin nous utiliserons le profil logarithmique de vitesse, défini par l'équation suivant :

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.45 * \ln\left(\frac{z}{0.2158}\right) \quad (6)$$

### 3. Modèle des équations mathématiques

#### 3.1 Hypothèses : Le modèle mathématique élaboré est défini selon les hypothèses suivantes :

- Les parois latérales étant réfléchissantes et isolées, les échanges de chaleur sont supposés unidirectionnels verticalement.
- La surface supérieure du lit de galets est considérée comme étant uniforme.
- Les températures du sol, des parois et de l'air intérieur sont supposées uniformes.
- La conduction dans la paroi vitrée est négligeable au niveau de son épaisseur.
- Le flux solaire diffus est considéré isotrope.
- L'air qui est le fluide de fonctionnement est supposé visqueux, newtonien et obéit à l'approximation de Boussinesq [7].
- Les propriétés du fluide sont supposées constantes.

#### 3.2 Equations régissant l'écoulement du fluide

- Equation de continuité  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}$  (7)

- Equations de quantité de mouvement

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \vartheta \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \rho f \quad (f: \text{force de volume}) \quad (8)$$

- Equation de l'énergie

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + T \beta \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \quad (9)$$

avec :

$$\phi \square : \text{Source interne de dissipation d'énergie. } \phi = 2\mu \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u)^2 \delta_{ij} \quad (10)$$

- Les équations de transports pour le modèle standard K-ε [8]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho K u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + S_\varepsilon \quad (12)$$

$G_k$  est l'énergie cinétique turbulente générée par le gradient des vitesses moyennes qui est évaluée, dans le cas de l'approximation de Boussinesq, par :

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (13)$$

$$\text{Avec } S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} : \text{ Le taux de déformation. } \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

$$G_b \text{ est l'énergie cinétique turbulente générée par l'effet de gravitation. } \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (15)$$

$$\text{avec: } \quad \mu_t = \rho C_u \frac{K^2}{\varepsilon} \text{ la viscosité turbulente.} \quad (16)$$

$$Pr_t = 0.85 \text{ le nombre de Prandtl turbulent.}$$

$Y_M$  est le paramètre relatif à la dilatation volumétrique pour un fluide compressible.

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_u = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{3\varepsilon} = \tan|V/U| \quad [9] \quad (17)$$

$S_k$  et  $S_\varepsilon$  sont les paramètres sources.

#### 4. Résultats et interprétation

Les résultats, présentés dans les figures ci-après, sont obtenues selon les données météorologiques (l'irradiation solaire et la température ambiante) qui évoluent le long de la journée. Sur la figure(4) nous présentons le profil des vitesses moyennes, des trois modèles de séchoir, qui évoluent à une hauteur de 5 cm de la claie de séchage. Les vitesses obtenues sont uniformes le long de la journée avec des valeurs qui diffèrent d'un capteur à un autre, excepté dans le capteur témoin où on enregistre des variations avec des amplitudes assez importantes. Les vitesses sont moins importantes dans le cas du séchoir qui nous sert de capteur témoin (capteur 1) comparativement aux autres capteurs. Les vitesses maximales sont enregistrées au niveau du séchoir 3. Ainsi, nous constatons qu'avec une configuration comparable à celle du séchoir 3, on obtient une nette augmentation de la vitesse de l'écoulement du fluide au niveau de la claie de séchage.

Dans la figure (5) nous avons tracé l'évolution de l'énergie cinétique turbulente à une hauteur de 5 cm de la claie de séchage. Cette dernière est d'autant plus importante que les vitesses d'écoulement sont importantes et par conséquent, la valeur minimale de l'énergie cinétique turbulente est obtenue au niveau du capteur 1 et la valeur maximale est obtenue au niveau du capteur 3. L'énergie cinétique turbulente nous renseigne sur l'intensité de la turbulence et celle-ci, par conséquent, augmenterait les capacités de mélange du système et favoriserait davantage l'échange thermique. Ainsi, nous constatons qu'un meilleur brassage du fluide est obtenu au niveau du capteur 3 du fait que l'intensité de la turbulence est beaucoup plus importante dans ce dernier.

La figure(6) et la figure (7) nous donnent l'évolution de la température moyenne, à une hauteur de 5 cm de la claie de séchage et à l'intérieure de l'enceinte de séchage, respectivement. La valeur maximale de température est obtenue au niveau du capteur 1, correspondant à l'heure où le rayonnement solaire atteint son apogée (13 heure). Cependant, avant le lever et après le coucher du soleil, les températures maximales sont enregistrées au niveau des capteurs 2 et 3, où elles évoluent presque de la même manière dans ces deux derniers, comparativement au capteur 1. Ainsi, nous pouvons constater que les installations restent opérationnelles pendant plusieurs heures en l'absence de l'unique source d'énergie (le rayonnement solaire) et ce grâce au système de stockage mis en place, réalisé par le lit de galets. Par contre, les modifications apportées aux séchoirs en question, permettront aux installations de maintenir les températures assez élevées et plus longtemps que possible, comparativement au séchoir classique (capteur 1).

Sur la figure (8) nous présentons l'évolution de la vitesse d'entrée dans les séchoirs. Les valeurs maximales de la vitesse sont enregistrées au niveau du capteur 3 et les valeurs minimales sont obtenues dans le capteur 1. L'augmentation de la vitesse aura pour effet l'augmentation du débit d'écoulement et par conséquent la diminution du temps de séchage.

Dans la figure (9) nous avons tracé l'évolution et de la température ambiante et de l'irradiation solaire d'une journée typique d'un mois de Septembre. Ainsi, on constate que la température maximale atteint les 310 K et la valeur maximale du rayonnement solaire avoisine la valeur de 800 W/m<sup>2</sup>.

Les résultats trouvés, en particulier les températures à l'intérieure de l'enceinte de séchage, s'approchent davantage de ceux trouvés dans les travaux de S. El Mokretar & al. [10] dans leurs études expérimentales du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir de type serre.

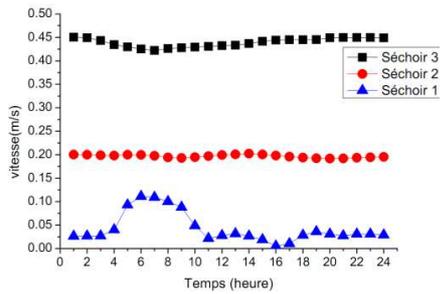


Figure 4 : Vitesse moyenne à une hauteur de 5cm de la claie (m/s)

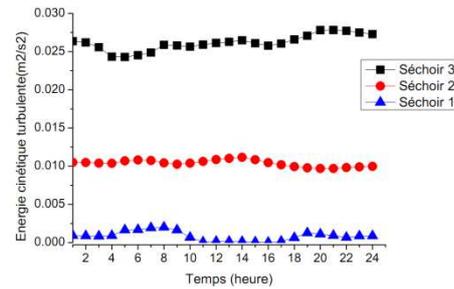


Figure 5 : Intensité moyenne de l'énergie cinétique turbulente à 5cm de hauteur de la claie (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)

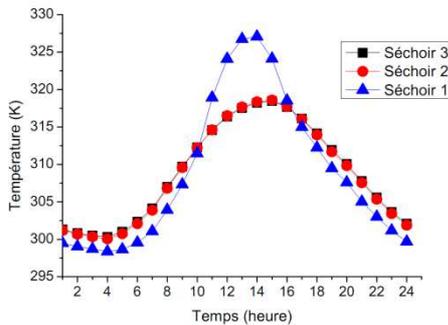


Figure 6 : Température moyenne à une hauteur de 10 cm de la claie (K)

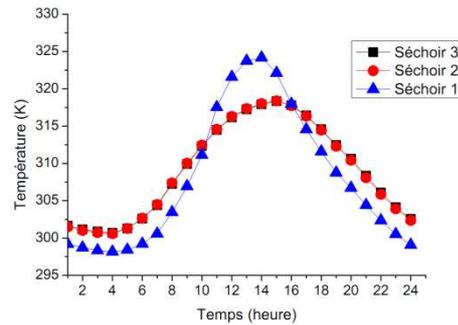


Figure 7 : Température moyenne dans l'enceinte de séchage (K)

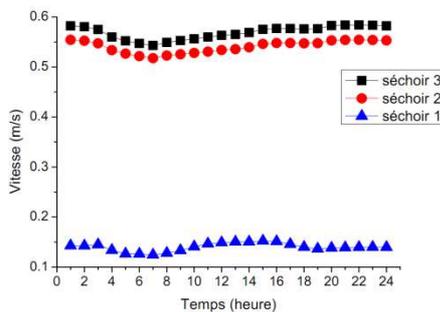


Figure 8 : Vitesse d'entrée moyenne dans le séchoir dans le séchoir solaire

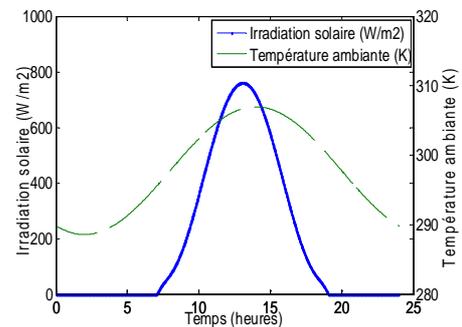


Figure 9 : Température ambiante (K) et irradiation solaire (W/m<sup>2</sup>) pour le mois de Septembre

## 5. Conclusion

Les résultats obtenus nous ont permis de constater qu'en modifiant le design d'un séchoir solaire nous permettrait d'améliorer significativement le rendement thermique dudit capteur. En effet, la modification effectuée au niveau du séchoir 2 et qui consiste à décaler la cheminée vers le milieu du vitrage nous a permis :

- Une augmentation de la température à l'intérieur de l'enceinte de séchage et au niveau de la claie de séchage avant le lever du soleil et après le coucher du soleil.
- Une turbulence plus importante au niveau de la claie de séchage, ce qui renforce davantage l'échange thermique entre le produit à sécher et le fluide en écoulement.
- Une augmentation de la vitesse de l'écoulement du fluide à l'entrée du séchoir et de passage au niveau de la claie de séchage et par conséquent une augmentation du débit d'écoulement.

En résumé, cela affectera d'une manière considérable le temps de séchage et par conséquent une augmentation non négligeable du rendement du séchoir en question. Cependant, l'augmentation du rendement dudit séchoir est plus significative dans le capteur 3, dont la géométrie est identique à celle du capteur 2 sauf au niveau de la cheminée, qui est d'une forme comparable à celle d'une hotte avec une entrée ramenée à une distance de 10 cm de hauteur de la claie de séchage.

## Nomenclature

### Symbole

|         |  |
|---------|--|
| Cp      | chaleur spécifique à pression constante, $\text{KJ. Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ |
| g       | accélération de la pesanteur, $\text{m. s}^{-2}$                           |
| K       | énergie cinétique de la turbulence, $\text{J. Kg}^{-1}. \text{m. s}^{-2}$  |
| L       | longueur caractéristique, m  |
| P       | pression, Pa   |
| Pr      | nombre de Prandtl  |
| Ra      | nombre de Rayleigh   |
| S       | terme source   |
| T       | température, K   |
| t       | temps, s   |
| u, v, w | composantes de vitesse, $\text{m. s}^{-1}$                                 |
| u*      | vitesse de frottement, $\text{m. s}^{-1}$                                  |
| u'      | fluctuation de vitesse, $\text{m. s}^{-1}$                                 |

|                |                            |
|----------------|----------------------------|
| x, y, z        | variables indépendantes, m |
| z <sub>0</sub> | paramètre de rugosité, m   |

### Symboles grecs

|                   |   |
|-------------------|---|
| $\lambda$         | conductivité thermique, $\text{w. m}^{-1}. \text{K}^{-1}$         |
| $\alpha$          | diffusivité thermique, $\text{m}^2. \text{s}^{-1}$                |
| $\varepsilon$     | taux de dissipation de la turbulence, $\text{m}^2. \text{s}^{-3}$ |
| $\mu$             | viscosité dynamique, $\text{Kg. m}^{-1}. \text{s}^{-1}$           |
| $\beta$           | coefficient de dilatation volumique, $\text{K}^{-1}$              |
| $\emptyset$       | source interne de dissipation d'énergie, w                        |
| $\rho$            | masse volumique, $\text{Kg. m}^{-3}$                              |
| $\delta_{ij}$     | symbole de Kronecker  |
| Exposant, Indices |   |
| t                 | turbulent   |

### Références

- [1] H. SEMAI & al. Effet de l'écoulement du vent sur le rendement d'un séchoir solaire suivant une géométrie adoptée, Congrès national de mécanique des fluides (CNMF). USTHB - ALGER, 2012.
- [2] T. Koyuncu, Performance of various designs of solar air heaters for crop drying applications, Renewable Energy, 31, pp. 1073–1088, 2006.
- [3] S. Youcef-Ali, J. Y. Desmons, Numerical and experimental study of a solar equipped with offset rectangular plate fin absorber plate, Renewable Energy, 31, pp. 2063–2075, 2006.
- [4] D. Njomo, Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre, Rev. Gén. Therm, 37 pp. 973-980, 1998.
- [5] R. Haxaire, Caractérisation et Modélisation des Ecoulements d'Air dans une Serre, Thèse de doctorat, Nice Sophia Antipolis, 1999.
- [6] Slimane Lebik, Simulation à L'aide du Code de Calcul CFD des Mécanismes Mis en Jeu dans le Refroidissement Evaporatif Combiné au Renouvellement d'Air dans une Serre, Mémoire de Magistère, Tizi-Ouzou, 2008.
- [7] P. K. Kundu-Ira M. Cohen, Fluid Méchanics, seconde édition.
- [8] B. E. Launder and D. B. Spalding, Lectures in Mathematical Models of turbulence, Academic Press, London, England, 1972.
- [9] R. A. W. M. Henkes, F. F. Van der Flugt, and C. J. Hoogendoorn, Natural convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-Number turbulente model, Int. J. Heat Transfert, 34: 1543-15557, 1991.
- [10] S. El Mokretar, R. Miri, M. Belhamel, Etude du Bilan d'Energie et de Masse d'un Séchoir de Type Serre, Applications au Séchage des Produits Agro-alimentaires. Rev. Energ. Ren., 7 :109-123, 2004.

