



Etude de l'effet des paramètres climatiques sur la cinétique de séchage des boues d'épuration

Nidhal BEN HASSINE* **, Xavier CHESNEAU* et Ali Hatem LAATAR**

* Laboratoire de Mathématiques et Physique, Université de Perpignan Via Domitia, 52 avenue Paul Alduy
66860 Perpignan Cedex 9, France.

** Laboratoire d'Energétique et Transferts Thermique et Massique, Faculté des Sciences de Bizerte 7021
Jarzouna, Tunisie.

benhassinenidhal@gmail.com, chesneau@univ-perp.fr et ahlaatar@gmail.com

Résumé : Le séchage solaire représente une solution aux problèmes environnementaux engendrés par la présence des boues d'épuration dans la nature. Malgré cela, la littérature concernant ce phénomène est pauvre. Nous avons donc mené une étude numérique de l'effet des conditions opératoires climatiques sur la cinétique de séchage des boues d'épurations. En effet, nous avons étudié l'effet des conditions opératoires climatiques sur l'évolution de la vitesse de séchage à l'aide de la méthode 'One-Factor-At-A-Time-method'. Le domaine de calcul est représenté par un canal horizontal dont la paroi supérieure est transparente au rayonnement alors que la partie inférieure est constituée de boues assimilées à un matériau poreux. Les équations régissant les transferts dans le canal sont les équations classiques de la convection forcée, alors que dans le milieu poreux les transferts sont décrits par le modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer. Une méthode implicite aux différences finies est utilisée pour discrétiser le système d'équations différentielles. Les systèmes algébriques obtenus sont résolus en utilisant les algorithmes de Gauss, Thomas et Gauss-Seidel. À cela, afin de déterminer la vitesse de séchage, nous avons associé un modèle de la cinétique de séchage du produit. Comme résultat, nous avons étudié l'effet du nombre de Reynolds, de l'humidité relative, de la température de l'air ambiant ainsi que l'effet du rayonnement solaire sur la vitesse de séchage.

Mots clés : Séchage solaire, boue d'épuration, vitesse de séchage

1. Introduction

Le traitement des boues des stations d'épuration s'impose comme étant une solution aux problèmes environnementaux que représentent les déchets urbains. Le séchage est une étape intermédiaire avant une valorisation énergétique ou agricole. En effet, le séchage solaire des boues est de plus en plus attrayant pour les petites et moyennes stations de traitement des eaux usées qui cherchent à optimiser la consommation d'énergie utilisée durant le séchage tout en conservant la qualité du produit sec. Pour atteindre cet objectif, il faut maîtriser les mécanismes des transferts couplés de chaleur et de masse à l'intérieur du produit à sécher et dans le fluide asséchant au cours de l'opération de séchage. Dans ce contexte, plusieurs travaux scientifiques, en majorités expérimentaux ont porté sur ce phénomène. Nous citons les travaux de H. amadou et al. [1, 2] qui proposent un modèle numérique de la cinétique de séchage basé sur le concept de la courbe caractéristique. La comparaison des résultats obtenus par ce modèle et ceux obtenus par des expériences de laboratoire montre une excellente concordance. R. Slim [3] a établi un modèle numérique du séchage combiné (convectif et conductif) des boues de stations d'épuration urbaines en tenant compte des conditions climatiques. Il a pu définir des cas optimaux de fonctionnement de la pompe à chaleur qui sert à la ventilation de la serre. Afin de définir les paramètres optimaux d'amélioration des transferts de chaleur et de masse durant le processus d'évaporation d'une couche poreuse saturée, Y. Chou et al. [4] ont mené une étude numérique sur l'effet du nombre de Reynolds et l'effet de l'épaisseur de la couche poreuse sur la distribution inter-faciale de la température, de la concentration, des flux de chaleur sensible et latent et du taux d'évaporation. Ils ont montré que l'augmentation du nombre de Reynolds engendre une intensification des taux de transferts thermique et massique. K. Piotr et al. [5] ont utilisé le code de calcul commercial Fluent (CFD) pour modéliser le phénomène de transfert de chaleur et de masse au cours d'un processus de séchage sous serre solaire des boues des stations d'épuration. Ils ont défini la fraction massique de la vapeur d'eau à l'interface par un polynôme d'ordre six en température. Ils ont présenté la variation de la

vitesse de séchage et de la température de la boue. L. Bennamoun, et al. [6] ont étudié expérimentalement le séchage des boues des stations d'épuration à l'aide d'un séchoir à convection forcée. Les résultats obtenus par cette expérience ont été comparés avec leurs propres études numériques. Cette comparaison a montré un bon accord entre les deux résultats dans le cas où les propriétés physiques de la boue sont fonction de la teneur en eau dans le produit.

À notre connaissance, aucune étude numérique concernant le séchage des boues en considérant des conditions ambiantes variables n'a été réalisée. Le but de notre étude est d'étudier le séchage des boues avec un flux solaire et une température ambiante variable au cours de la journée.

2. Position du problème

Le système étudié est un canal horizontal de longueur L et de hauteur H dont la paroi supérieure est une couverture transparente au rayonnement solaire et la partie inférieure un matériau poreux d'épaisseur " e " qui a les caractéristiques de boues des stations d'épuration. Cette dernière est exposée à un écoulement laminaire forcé entrant dans le canal avec un profil de vitesse parabolique, une température T_0 , une humidité relative Hr_0 et une pression P_0 constantes.

Un repère cartésien est associé à ce modèle physique. O qui représente l'origine de ce repère est placée à l'extrémité inférieure de la couche poreuse (boue). L'abscisse x est compté positivement dans la direction normale à la paroi latérale et l'ordonnée y est comptée positivement dans la direction perpendiculaire à la paroi inférieure.

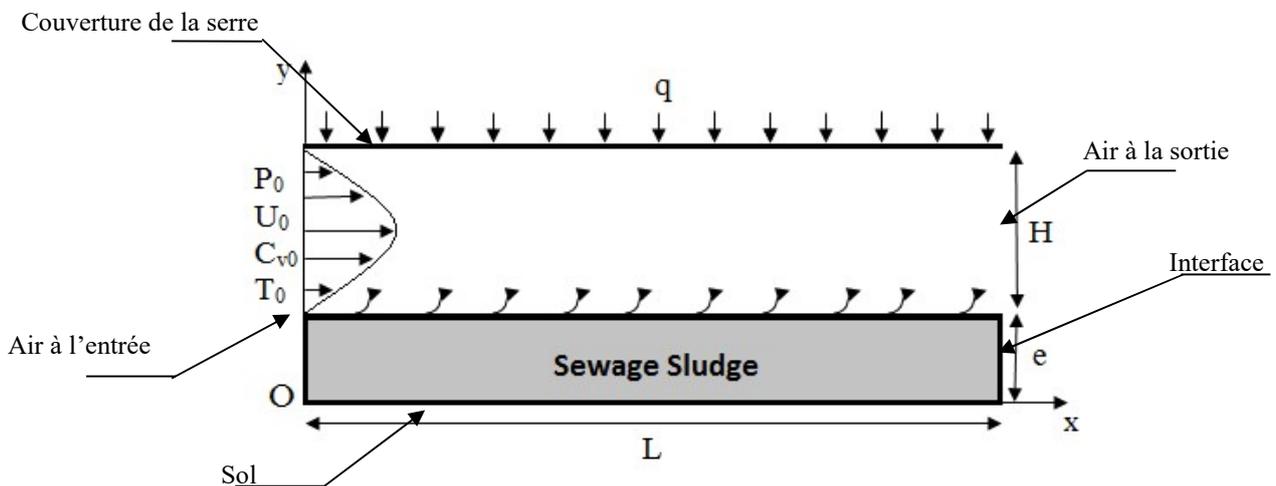


Figure 1 : Configuration géométrique

3. Formulation mathématique

3.1. Hypothèses simplificatrices

Pour cette étude nous adoptons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les transferts sont laminaires et bidimensionnels
- Le fluide est newtonien et incompressible
- La dissipation visqueuse est négligeable
- Les effets Soret et Dufour sont négligeables
- L'approximation de Boussinesq est retenue
- L'air humide est considéré comme un gaz parfait.
- L'interface boue vapeur est en équilibre thermodynamique.
- Le milieu poreux est isotrope.

3.2. Equations de conservation et conditions aux limites

3.2.1. Equations de conservation

Afin de généraliser les résultats, les équations ont été adimensionnalisées par les variables suivantes :

$$x^* = \frac{x}{H}; y^* = \frac{y}{H}; u^* = \frac{u}{U_0}; v^* = \frac{v}{U_0}; T^* = \frac{T}{T_0}; C^* = \frac{C}{C_0}; t^* = \frac{tU_0}{H}; P^* = \frac{P}{\rho_f U_0}$$

Après introduction des variables précédentes, les équations adimensionnelles exprimant la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces dans la serre sont :

* Conservation de la masse

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

* Conservation de la quantité de mouvement (sur l'axe des X)

$$\frac{\partial u_f^*}{\partial t^*} + u_f^* \frac{\partial u_f^*}{\partial x^*} + v_f^* \frac{\partial u_f^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P_f^*}{\partial x^*} + \frac{1}{\text{Re}_f} \left(\frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial u_f^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\partial u_f^*}{\partial y^*} \right) \right) \quad (2)$$

* Conservation de la quantité de mouvement (sur l'axe des Y)

$$\frac{\partial v_f^*}{\partial t^*} + u_f^* \frac{\partial v_f^*}{\partial x^*} + v_f^* \frac{\partial v_f^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P_f^*}{\partial y^*} + \frac{1}{\text{Re}_f} \left(\frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial v_f^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\partial v_f^*}{\partial y^*} \right) \right) \quad (3)$$

* Conservation de l'énergie

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial t^*} + u_f^* \frac{\partial T_f^*}{\partial x^*} + v_f^* \frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\text{Pr}_f \text{Re}_f} \left(\frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \right) \right) \quad (4)$$

* Conservation des espèces

$$\frac{\partial C_f^*}{\partial t^*} + u_f^* \frac{\partial C_f^*}{\partial x^*} + v_f^* \frac{\partial C_f^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\text{Sc}_f \text{Re}_f} \left(\frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial C_f^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\partial C_f^*}{\partial y^*} \right) \right) \quad (5)$$

$$\text{Avec: } \text{Re}_f = \frac{H \times U_0}{\nu_f}; \text{Pr}_f = \frac{\nu_f}{\alpha_f}; \text{Sc}_f = \frac{\nu_f}{D_v}; \alpha_f = \frac{\lambda_f}{\rho_f C_p}$$

Afin d'assurer la conservation de la quantité de mouvement dans le milieu poreux, nous utilisons le modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer [7]. Pour s'affranchir de la difficulté posée par les conditions aux limites à imposer à la pression pour résoudre les équations de la quantité de mouvement dans le milieu poreux, celles-ci sont écrites en utilisant la formulation vorticité-fonction de courant [8].

* Conservation de la fonction de courant

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^{*2}} = -\Omega \quad (6)$$

* Conservation de la vorticité

$$\frac{1}{\varphi} \frac{\partial \Omega^*}{\partial t^*} + \frac{u_p^*}{\varphi^2} \frac{\partial \Omega^*}{\partial x^*} + \frac{v_p^*}{\varphi^2} \frac{\partial \Omega^*}{\partial y^*} = -\frac{1}{\text{Re}_p \text{Da}} \Omega^* - \frac{C_F}{\sqrt{\text{Da}}} \sqrt{u_p^{*2} + v_p^{*2}} \Omega^* + \frac{1}{\varphi \text{Re}_p} \left(\frac{\partial^2 \Omega^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \Omega^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (7)$$

* Conservation de l'énergie

$$\frac{\partial T_p^*}{\partial t^*} + u_p^* \frac{\partial T_p^*}{\partial x^*} + v_p^* \frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\text{Pr}_p \text{Re}_p} \left(\frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial T_p^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \right) \right) \quad (8)$$

$$\text{Avec: } \text{Re}_p = \frac{H \times U_0}{\nu_p}; \text{Pr}_p = \frac{\nu_p}{\alpha_p}; \text{Da} = \frac{k}{H^2}; u_p^* = \frac{\partial \psi^*}{\partial y^*}; v_p^* = -\frac{\partial \psi^*}{\partial x^*}$$

3.2.2 Conditions initiales et aux limites

Initialement la teneur en eau et la température sont uniformes à l'intérieur du milieu poreux. Dans le canal, la température, l'humidité et la vitesse sont également uniformes. En effet, la teneur en eau initiale de la boue en base humide est de 85% et sa température initiale est égale à la température de l'air ambiant T_0 .

Les conditions aux limites dynamiques, thermiques et massiques dans le canal ainsi que dans le milieu poreux sont présentées ci-dessous.

Pour la serre

* Entrée

$$u_f^* = 6(y^* - y^{*2}); v_f^* = 0 ; T_f^* = 1 ; C_f^* = 1$$

* Sortie

$$\frac{\partial u_f^*}{\partial x^*} = 0 ; \frac{\partial v_f^*}{\partial x^*} = 0 ; \frac{\partial T_f^*}{\partial x^*} = 0 ; \frac{\partial C_f^*}{\partial x^*} = 0$$

* Couverture

$$u_f^* = 0 ; v_f^* = 0 ; \frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = 0 ; \frac{\partial C_f^*}{\partial y^*} = 0$$

Pour la boue :

* Paroi gauche et paroi droite

$$\psi^* = 0 ; \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial x^{*2}} = -\Omega^* ; \frac{\partial T_p^*}{\partial x^*} = 0$$

* Sol

$$\psi^* = 0 ; \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial y^{*2}} = -\Omega^* ; \frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} = 0$$

Pour l'interface boue-air intérieur :

La composante longitudinale de la vitesse est obtenue en assurant la continuité des contraintes de cisaillement.

$$\mu_f \frac{\partial u_f^*}{\partial y^*} = \mu_p \frac{\partial u_p^*}{\partial y^*}$$

Pour la fonction de courant et la vorticité, les conditions aux limites sont :

$$\frac{\partial \psi^*}{\partial y^*} = u_p^* ; \frac{-\partial \psi^*}{\partial x^*} = v_p^* ; -\Omega^* = \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial x^{*2}}$$

Le bilan thermique nous donne :

$$\frac{H \times \alpha_s \times \tau_p \times q}{T_0} = \lambda_p \left(\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \right) - \lambda_f \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \right) - \frac{\rho_f \times L_v}{T_0} \left[\frac{D_v}{(1/C_0 - C_f^*)} \frac{\partial C_f^*}{\partial y^*} \right]_{\text{interface}}$$

En supposant que l'interface boue-air n'est perméable que pour la vapeur d'eau, la vitesse à l'interface s'écrit comme suit :

$$v^* = \frac{Ms}{\rho \times S \times U_0} \times \left(\frac{-dX}{dt} \right)_{t^*} \quad (9)$$

En supposant que le mélange air-vapeur d'eau est un gaz parfait et que l'interface air-poreux est à un équilibre thermodynamique local. La fraction de masse à l'interface peut être calculée à partir de :

$$v^* = \frac{-1}{\text{Re}_f \text{Sc}_f} \left(\frac{1}{\frac{1}{C_0} - C_{fw}^*} \right) \left(\frac{\partial C_f^*}{\partial y^*} \right)_w \quad (10)$$

Les évolutions quotidiennes du rayonnement solaire global et de la température de l'air ambiant sont approximées par des fonctions sinusoïdales:

$$q(h) = A \sin \left[\frac{\pi}{\Lambda} (h - h_s) \right]$$

$$T_0(h) = \frac{T_{0 \max} + T_{0 \min}}{2} - \frac{T_{0 \max} - T_{0 \min}}{2} \sin \left(\frac{2\pi h}{\Lambda} - \phi \right)$$

3.3 Modèle de la cinétique de séchage

Afin de déterminer la vitesse de séchage, nous adoptons le modèle de la cinétique de séchage des boues de station d'épuration défini et validé par Amadou [2]. Ce modèle est basé sur le concept de courbe caractéristique [9].

$$\left(-\frac{dX}{dt} \right)_{t^*} = \left(-\frac{dX}{dt} \right)_1 \times f(Xr) \quad (11)$$

Avec: $\left(-\frac{dX}{dt} \right)_1$ la vitesse de séchage en phase constante.

$f(Xr) = A_1 \times Xr + A_2 \times Xr^2 + A_3 \times Xr^3$ la vitesse réduite de séchage.

$$X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \text{ la teneur en eau réduite.}$$

Pour les boues d'épuration, la teneur en eau à l'équilibre est donnée par l'expression suivante [10]:

$$X_{eq} = k \left(\frac{Hr}{1 - Hr} \right)^n \quad (12)$$

A_1 , A_2 , A_3 , k et n sont des constantes déterminées expérimentalement par Amadou [2]. Les valeurs sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : paramètres du modèle

Paramètre	Valeur
k	0.112
n	0.416
A_1	2.394
A_2	-3.029
A_3	1.635

4. Méthode numérique et validations

Les équations régissant le phénomène dans les deux milieux sont discrétisées d'une manière implicite en temps et en espace en utilisant la méthode des différences finies. La résolution numérique est effectuée par les algorithmes de Gauss et Thomas dans l'écoulement d'air et par l'algorithme de Gauss-Seidel dans le milieu poreux. La résolution s'effectue ligne par ligne dans le sens de l'écoulement et le maillage retenu est un maillage régulier dans chacun des milieux.

Le code de calcul élaboré a été validé pour les deux milieux. En effet, pour le milieu poreux, nous avons comparé nos résultats avec ceux de Mohamad [11] dans le cas du transfert de chaleur par convection forcée dans un canal horizontal totalement rempli d'un milieu poreux et dont les parois latérales sont maintenues à une température constante. Pour l'écoulement, nous avons comparé le nombre de Nusselt moyen obtenu numériquement dans le cas d'un écoulement laminaire dans une conduite horizontale où les parois sont maintenues à une température constante avec la valeur obtenue à l'aide de la corrélation développée par Sieder et Tate [12]. Dans les deux cas, l'écart maximum n'excède pas 4%.

Nous avons également validé le modèle de cinétique de séchage utilisé. Pour cela, nous avons comparé nos résultats avec ceux de Amadou [2] dans les conditions suivantes: $T_0 = 323,68$ K, $Hr_0 = 63,59\%$, $U_0 = 1,79$ m / s et $q = 728$ W / m². Cette comparaison montre un accord acceptable et nous permet de valider le modèle.

5. Principaux résultats

Afin de quantifier l'effet des conditions opératoires climatiques (rayonnement solaire, température ambiante, humidité de l'air ambiant et nombre de Reynolds) sur l'évolution de la vitesse de séchage, nous avons fait appel à une méthode nommée 'One-Factor-At-A-Time-method' elle est bien décrite par Saltelli et al. [13]. Elle consiste à faire varier le paramètre étudié de $\pm 10\%$ autour d'une valeur donnée. La modification de la variable par $+10\%$ et -10% produit deux valeurs du débit d'eau évaporée. La comparaison de ces valeurs avec le débit évaporé obtenu pour l'essai de base permet de déterminer le pourcentage de variation. Le résultat retenu sera celui qui donne la plus grande variation entre le paramètre donné et ceux de $\pm 10\%$.

La quantification se fait par la comparaison de deux variables, qui sont la variation en pourcentage et l'Indice de Sensibilité (IS). Ces deux paramètres sont définis comme suit :

$$\text{Variation (\%)} = \left| \frac{R_{\bar{x}} - R_b}{R_b} \right| \times 100$$

$$\text{IS} = \frac{\frac{R_{\bar{x}} - R_b}{R_{\text{moy}}}}{\frac{E_{\bar{x}} - E_b}{E_{\text{moy}}}}$$

L'essai de base est défini par les conditions opératoires suivantes (tableau 2) :

Tableau 2 : Conditions opératoires climatique de l'essai de base.

Paramètre	Valeur
Rayonnement solaire maximal (W/m ²)	700
Température ambiante maximale (K)	45
Humidité relative (%)	50
Nombre de Reynolds	1000

Le tableau 3 présente l'effet des conditions climatiques opératoires en calculant le pourcentage de variation et l'indice de sensibilité. Nous constatons que, le rayonnement solaire à l'effet le plus important sur le débit évaporé et donc sur la vitesse de séchage. Sa variation et de l'ordre de 9.86% et son indice de sensibilité est égale à 0.986 pour une variation du Rayonnement solaire de 10%. Le deuxième paramètre qui influe sur la vitesse de séchage est la température ambiante, son pourcentage de variation est de l'ordre de 3.65 et son indice de sensibilité est égal à 0.376. Le paramètre qui agit le moins sur la vitesse de séchage est le nombre de Reynolds, autrement dit la vitesse de l'air ambiant. Dans la gamme du nombre de Reynolds étudié le pourcentage de variation est égal à 1.02 % et l'indice de sensibilité est de l'ordre de 0.097. Concernant l'effet de l'humidité relative, nous remarquons que l'ordre de grandeur du pourcentage de variation est le même que pour le nombre de Reynolds, pour l'indice de variation, nous constatons qu'il est de signe négatif ce qui signifie qu'une augmentation de l'humidité relative engendre une diminution de la vitesse de séchage, sa valeur est égale à -0.103 (diagramme 1).

Tableau 3 : Variation et indice de sensibilité.

Q _{max} (W/m ²)	T _{0max} (K)	Hr (%)	Re	Q (kg/h)	variation %	IS
630	45	50	1000	1.121	9.86	0.986
700				1.241		
770				1.364		
700	40.5	50	1000	1.196	3.65	0.375
	45			1.241		
	49.5			1.287		
700	45	45	1000	1.255	1.09	-0.103
		50		1.241		
		55		1.228		
700	45	50	900	1.229	1.02	0.097
			1000	1.241		
			1100	1.253		

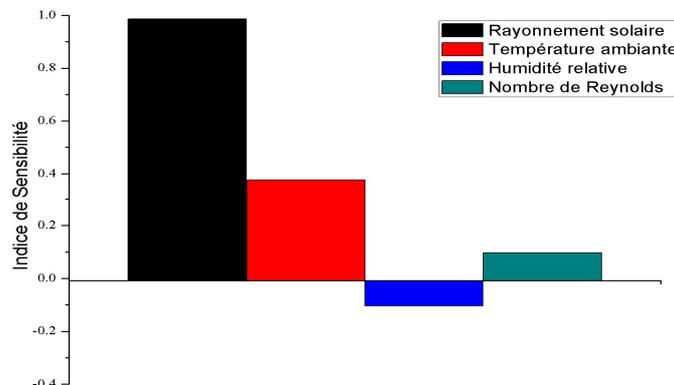


Figure 2 : indice de sensibilité en fonction des paramètres climatiques.

Le calcul du pourcentage de variation et de l'indice de sensibilité est fait par des résultats obtenus pour la première journée de séchage. Toutefois, les résultats d'une analyse de sensibilité doivent être manipulés avec beaucoup de précision et de précaution. En effet, la sensibilité ne dépend pas des conditions opératoires seulement mais plutôt de la période choisie et des processus internes affectés par ces conditions opératoires.

- [8] E. F. Nogotov, Application of Numerical Methods to Heat Transfer, Paris: Unesco, *McGraw-Hill Book Company*, (1978).
- [9] Van Meel, Adiabatic Convection Batch Drying with Recirculation of Air. *Chemical Engineering Science*, Vol 9, pp 36-44, (1957).
- [10] C. R. Oswin, The Kinetics of Package Life. *International Chemical Industry*, Vol 65, 419-421, (1946).
- [11] A.A. Mohamad, Heat Transfer Enhancements in Heat Exchangers Fitted with Porous Media Part I: Constant Wall Temperature, *International Journal of Thermal Sciences* 42, 385–395, (2003).
- [12] Sieder, E. N., and Tate, G. E. Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. *Industrial & Engineering Chemistry*, Vol. 28, no. 12, pp. 1429–1435, (1936).
- [13] A. Saltelli, S. Tarantola and F. Campolongo, "Sensitivity Analysis as an Ingredient of Modeling", *Statistical Science*, Vol. 15, No. 4 , pp. 377-395, (2000).