

## ETUDE COMPARATIVE DU SECHAGE A HAUTE TEMPERATURE A L'AIR SEC, L'AIR HUMIDE ET A LA VAPEUR D'EAU SURCHAUFFE D'UN MATERIAU POREUX ET DETERMINATION DE LA TEMPERATURE D'INVERSION

M. ben abdelhamid<sup>1</sup>, J. Sghaier<sup>1,2\*</sup>, D. Lecomte<sup>3</sup>, A. Belghith<sup>1</sup>, H. Sammouda<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique (LETTM)  
Département de physique, Faculté des Sciences de Tunis,  
Campus universitaire 1060, Tunis, Tunisie

[Ali.Belghith@fst.rnu.tn](mailto:Ali.Belghith@fst.rnu.tn)

<sup>2</sup> Département de Génie Energétique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir,  
Avenue Ibn Eljazzar, 5019 Monastir, Tunisie

[Jalila.Sghaier@enim.rnu.tn](mailto:Jalila.Sghaier@enim.rnu.tn)

<sup>3</sup> Université de Toulouse, Ecole des Mines d'Albi, Centre (RAPSODEE).  
Campus Universitaire de Jarlard, Route de Teillet, 81013 Albi CT Cedex 09 - France

[Didier.lecomte@enstimac.fr](mailto:Didier.lecomte@enstimac.fr)

<sup>4</sup> Ecole Supérieure des Sciences et de Technologie (ESST-HSousse)  
Rue Amine EL Abbassi 4011 Hammam Sousse Tunisie

[habib.sammouda@fsm.rnu.tn](mailto:habib.sammouda@fsm.rnu.tn)

### RESUME

Au cours de la comparaison du séchage en vapeur d'eau surchauffée (V.E.S) et à l'air sec d'une particule poreuse de céramique et en suivant l'évolution de taux d'évaporation de l'eau en fonction de la température du fluide séchant, on constate que ces deux courbes se croisent en un point qui correspond à une valeur de température critique. Cette température est appelée par convention température d'inversion ( $T_0$ ), pour la quelle le flux d'eau évaporé est le même dans le cas du séchage à l'air sec et la V.E.S. Ainsi lorsque la température de la vapeur séchante  $T_{ves} < T_0$ , le séchage à l'air sec est plus rapide, en dessus le phénomène s'inverse. Dans ce travail, on présente un modèle mathématique permettant de simuler le séchage en vapeur d'eau surchauffée et à l'air sec d'une particule poreuse de céramique. La comparaison des cinétiques de séchage permettra de déterminer la température d'inversion. Par la suite, on étudie l'influence des conditions de séchage sur cette température, de même les paramètres internes du milieu poreux.

### 1. INTRODUCTION

Le procédé de séchage en vapeur d'eau surchauffée permet une économie substantielle d'énergie à condition que la vapeur extraite du produit soit condensée et que la chaleur de condensation est récupérée et utilisée ailleurs dans l'ensemble du procédé. Ce procédé permet de travailler en boucle fermée. Le gain d'énergie par rapport au séchage à l'air [1, 2, 3] est considérable. D'autre part, l'absence de l'air élimine les risques d'oxydation, les risques d'incendies et d'explosion avec les produits combustibles à fort PCI. On note que dans certains cas, ce procédé de séchage garanti une qualité améliorée du produit séché. Plusieurs travaux présentent des études technico-économiques concernant le séchage en vapeur d'eau surchauffée et à l'air sec. La question qui se pose est le critère pour le choix d'un procédé de séchage par rapport à l'autre. Dans cet objectif, le concept de la température d'inversion a été développé afin de permettre un choix adéquat du fluide séchant, en tenant compte du gain d'énergie et de la qualité de produit à sécher. Cette température peut être définie selon

différentes méthodes et pour différentes situations physiques. Chu et al [4] sont les premiers qui ont montré expérimentalement qu'une évaporation plus intense se produit au cours du séchage en vapeur d'eau surchauffée qu'à l'air. Yoshida et Hyodo [5] ont fait des expériences en utilisant une colonne à paroi mouillée et ils étaient les premiers à trouver cette température d'inversion. Initialement, ils ont assumé qu'à cette température, le taux d'évaporation de l'eau devient indépendant de l'humidité du gaz pour un flux massique constant à l'entrée. Depuis, plusieurs auteurs [6,7, 8] se sont intéressés à la détermination théorique de cette température d'inversion, révélant la dépendance de la température d'inversion de la composition du gaz. Cette dernière peut varier entre 160°C et 260°C selon le régime du flux de fluide (laminaire ou turbulent). Ces auteurs ont étudié l'évaporation d'un film d'eau dans l'air sec, dans l'air humide et la vapeur d'eau surchauffée. Ils ont proposé des expressions analytiques de la température d'inversion.

Malgré la simplicité du problème physique et les hypothèses simplificatrices utilisées par ces auteurs, des différentes valeurs théoriques sont trouvées concernant cette température. Dans le cas d'un milieu poreux, la détermination de celle ci est beaucoup plus difficile. En effet, la structure et la géométrie d'un milieu poreux sont plus complexes. Dans la littérature, on trouve peu des travaux concernant la température d'inversion dans le cas du séchage d'un milieu poreux. Parmi ces travaux, on cite ceux de Chen et al [9], Suvarnakuta et al [10], Shibata et al [11] et Messai et al [12], qui se sont intéressés à la température d'inversion dans le cas du séchage d'un milieu poreux en se basant sur des bilans de masse et de chaleur. Dans ce travail, on présente un modèle complet tenant compte de tous les gradients moteurs, (température, teneur en eau et pression de la phase gaz) simulant le séchage à l'air sec, l'air humide et la vapeur d'eau surchauffée d'une particule poreuse de céramique. On détermine la température d'inversion durant la phase à vitesse de séchage constante et on étudie l'influence de l'humidité de l'air, du débit massique du fluide séchant (air ou V.E.S) ainsi que la pression.

## 2. MODELISATION :

On part d'un modèle complet pour décrire les transferts couplés de chaleur et de masse au cours du séchage d'une particule poreuse sphérique dans une configuration unidimensionnelle (radiale). Ce modèle est basé sur la théorie de prise de moyenne dans le sens de Whitaker [13].

Le système d'équations décrivant les transferts couplés est le suivant :

### Equation de conservation de l'énergie :

$$\begin{aligned} & \langle \rho C_p \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + (\rho_l C_{pl} \langle V_l \rangle + \langle \rho_v \rangle^s C_{pv} \langle V_v \rangle + \langle \rho_a \rangle^s C_{pa} \langle V_{va} \rangle) \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial r} \\ & = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 B1 \frac{\partial X}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 B2 \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 B3 \frac{\partial \langle P_s \rangle^s}{\partial r}) \end{aligned} \quad (1)$$

### Equation de la teneur en eau :

$$\rho_s \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 A1 \frac{\partial X}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 A2 \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 A3 \frac{\partial \langle P_s \rangle^s}{\partial r}) \quad (2)$$

Avec X teneur en eau définie par :  $X = \frac{\langle \rho_l \rangle + \langle \rho_v \rangle}{\langle \rho_s \rangle}$

### Equation de pression :

$$\varepsilon(1-s) \frac{M_s}{RT} \frac{\partial \langle P_s \rangle^s}{\partial t} = - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 H1 \frac{\partial X}{\partial r}) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 H2 \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 H3 \frac{\partial \langle P_s \rangle^s}{\partial r}) \quad (3)$$

Les coefficients  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, H_1, H_2$  et  $H_3$  se trouvent en annexe.

### Les conditions initiales et aux limites

Initialement la température, la teneur en eau moyenne sont uniformes :

$$T=T_i, \quad X=X_i$$

La continuité de flux de chaleur et la continuité de la pression à la surface du produit ( $r=R$ ) permettent d'écrire:

$$\begin{aligned} [-\lambda_{eff} \mathbf{grad} \langle T \rangle + \Delta H_{vap} \rho_l \langle \mathbf{v}_l \rangle] \mathbf{n} &= h_i (\langle T \rangle - T_\infty) \\ [\rho_l \langle \mathbf{v}_l \rangle + \langle \rho_v \rangle^s \langle \mathbf{v}_v \rangle] \mathbf{n} &= F_m \\ \langle P_s \rangle^s &= P_{atm} \end{aligned} \quad (4)$$

La symétrie du problème impose Pour  $r=0$

$$\begin{aligned} [-\lambda_{eff} \mathbf{grad} \langle T \rangle + \Delta H_{vap} \rho_l \langle \mathbf{v}_l \rangle] \mathbf{n} &= 0 \\ [\rho_l \langle \mathbf{v}_l \rangle + \langle \rho_v \rangle^s \langle \mathbf{v}_v \rangle] \mathbf{n} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Le coefficient de transfert de chaleur  $h$  est donné par :

$$h = \frac{\lambda_g Nu}{d} \quad \text{Avec } Nu \text{ le nombre de Nusselt déterminé par la corrélation :}$$

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (6)$$

Dans le cas de séchage à l'air humide et en considérant ce dernier comme un mélange de gaz parfaits l'expression de flux de masse peut s'écrire:

$$F_m = \frac{h_m M}{R} \left( \frac{P_{vsurf}}{T_{surf}} - \frac{P_{v\infty}}{T_\infty} \right) \quad (7)$$

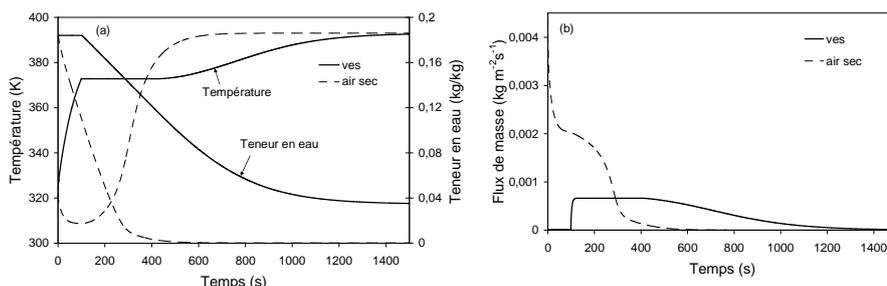
$P_{vsurf}$  est la pression partielle de la vapeur à la surface du produit et  $P_{v\infty}$  est la pression du fluide séchant. Avec  $h_m$  est le coefficient d'échange massique définie par :

$$h_m = \frac{D_m}{d} Sh \quad \text{ou } Sh \text{ est le nombre de Scherwood} \quad sh = 2 + 0.552 Re^{0.53} Sc^{0.33} \quad (8)$$

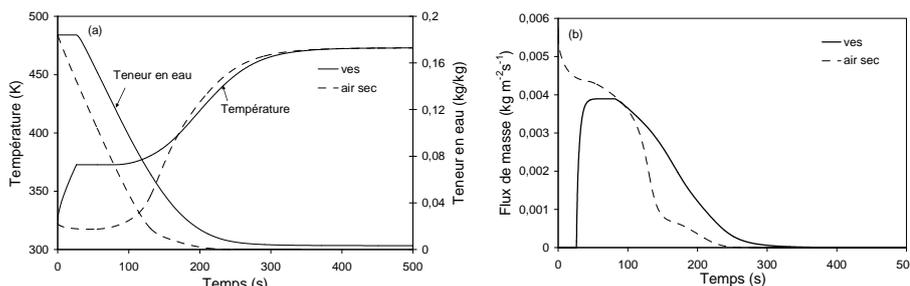
### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

La résolution numérique du système d'équations décrivant le séchage est effectuée par la méthode des volumes finis avec un maillage non uniforme. Pour le traitement des conditions aux limites, il faut préciser que l'équation (7) n'est plus valable dans le cas du séchage à la V.E.S car il n'y a pas de résistance au transfert de matière. Le calcul de flux de matière est déterminé par une méthode de dichotomie et la condition physique à vérifier est la condition de pression. Pour plus de détail on peut se référer à l'article Sghaier et al (14).

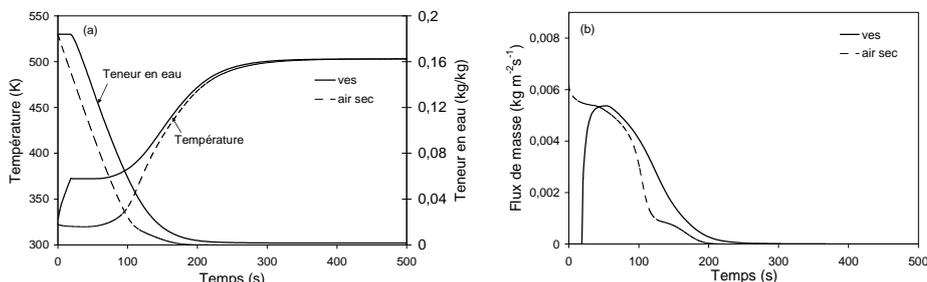
Les figures (1, 2, 3, 4) présentent une comparaison des courbes de séchage à des différentes températures du fluide séchant (air sec, vapeur d'eau surchauffée) dans des mêmes conditions de débit et de pression. On constate que pour une température inférieure à 230 °C, l'évolution du maximum du flux de masse dans le cas du séchage à l'air est supérieure à celui dans le cas de du séchage à la VES, au delà de cette température le phénomène s'inverse. Ceci met en évidence l'existence de la température d'inversion. Il faut noter que cette température est déterminée par rapport à la vitesse de séchage constante et pour des conditions de pression et de débit massique bien déterminés. On montre dans ce qui suit l'influence de la valeur de température par plusieurs paramètres tel que le diamètre de la particule, le débit massique et la pression du fluide séchant.



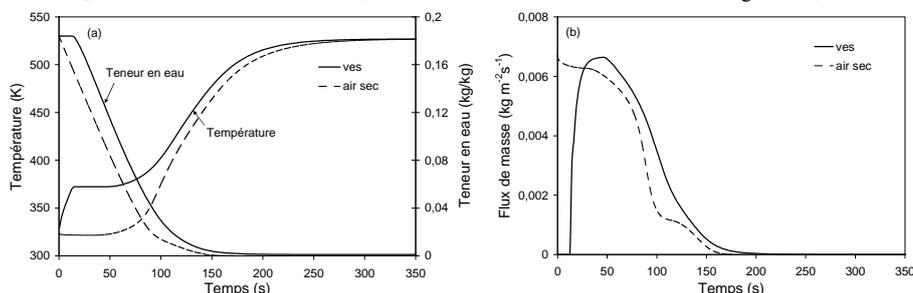
**Figure 1.** Comparaison des cinétiques de séchage à la VES et à l'air sec d'une particule poreuse de céramique (a) température et teneur en eau moyenne (b) flux de masse. pour les conditions  $T_g=393K$   $P= 1$  bar,  $d=1cm$ ,  $m_g= 1kg/m^2.s$



**Figure 2.** Comparaison des cinétiques de séchage à la VES et à l'air sec d'une particule poreuse de céramique (a) température et teneur en eau (b) flux de masse . pour les conditions  $T_g=473$ ,  $P= 1$  bar,  $d=1cm$ ,  $m_g= 1kg/m^2.S$



**Figure 3.** Comparaison des cinétiques de séchage à la VES et à l'air sec d'une particule poreuse de céramique (a) température et teneur en eau (b) flux de masse. pour les conditions  $T_g=503K$ ,  $P= 1$  bar,  $d=1cm$ ,  $m_g= 1kg/m^2.S$



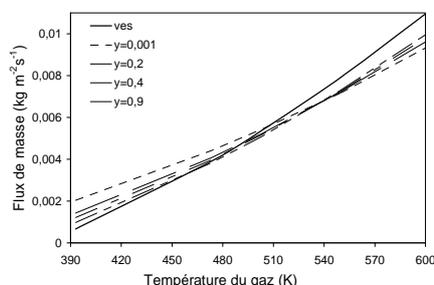
**Figure 4.** Comparaison : des cinétiques de séchage à la VES et à l'air sec d'une particule poreuse de céramique (a) température et teneur en eau (b) flux de masse. pour les conditions  $T_g=523K$   $P= 1$  bar,  $d=1cm$ ,  $m_g= 1kg/m^2.S$

A partir de la comparaison présentée précédemment, on a pu déterminer la température d'inversion, cette dernière est calculée durant la période à vitesse de séchage constante.

La température trouvée est égale à 503K pour une particule sphérique de céramique dans les conditions précisées ci-dessus. Cette valeur trouvée est conforme aux résultats trouvés dans la littérature et qui varie entre 433K et 523K.

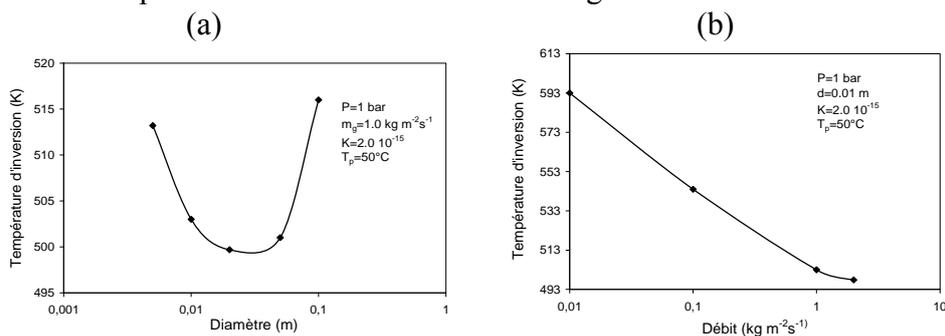
#### 4. Tests de sensibilité :

Sur la figure (5), on représente l'effet de l'humidité sur la température d'inversion, on



**Figure 5** influence de l'humidité de l'air sur la température d'inversion.

constate que cette valeur diminue en augmentant l'humidité de l'air, ce qui est confirmé par des résultats de la littérature. De même, on a essayé de tester l'effet du diamètre de la particule figure (6 a), on remarque que la courbe admet un minimum. Ce comportement est trouvé aussi par Chen et al dans le cas du séchage du charbon actif. Sur la figure 6(b), on.



**Figure 6** : (a) influence du diamètre sur la température d'inversion.  
(b) influence du débit massique du fluide séchant sur la température d'inversion

présente l'effet l'influence de débit massique du fluide séchant sur la température d'inversion. On constate, que cette température décroît linéairement jusqu'à un débit de  $1\text{kg/m}^2\text{s}^{-1}$  puis la variation demeure presque constante.

#### 5. CONCLUSION

Dans ce travail, on a proposé un modèle permettant de déterminer la température d'inversion. La valeur trouvée dans les conditions de séchage étudiés est conforme aux résultats de la littérature. De même des études de sensibilités ont été effectuées pour suivre l'effet du changement des conditions de séchage, tel que l'humidité de l'air, le débit massique et la pression. Les résultats trouvés traduisent un comportement analogue aux résultats de la bibliographie dans le cas du séchage des milieux poreux.

#### 6. REFERENCES

[1]. Kumar, P., and Mujumdar, A. S. Superheated steam drying: A bibliography. *Drying Technology* 1990, 8 (1): 195-205.

- [2]. Devahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponronnarit, S., Mujumdar, A. S. A Comparative study of low-Pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. *Drying Technology* 2004, 22(8): 1845-1867.
- [3]. Nomura, T. and T. Hyodo. 1985. Behavior of inversion point temperature and new applications of superheated vapour drying. In *Drying' 85, Selection of Papers from 4<sup>th</sup> International Drying Symposium*, 804-809. Washington, DC: Society of Chemical Engineers.
- [4]. Chu, J. C., Lane A.M., Conklin D. Evaporation of liquids into their superheated vapour. *Ind. Engng. Chem* 1953, 45: 1586–1591.
- [5]. Yoshida, T., and Hyodo, T. Evaporation of water in air humid air, and superheated steam. *Ind. Engng. Chem. Process Des. Dev* 1970, 9: 207–214.
- [6]. Schwartze, J.P., Bröcker, S. A theoretical explanation of the inversion temperature. *Chemical Engineering Journal* 2002. 86: 61-67.
- [7]. Costa, V.A.F.; Neto da Silva, F. On the rate of evaporation of water into a stream of dry air, humidified air and superheated steam, and the inversion temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46: 3717–3726.
- [8]. E.P. Volchkov, A.I. Leontiev, S.N. Makarova. Finding the inversion temperature for water evaporation into an air–steam mixture. *Int journal of Heat and Mass Transfer* 2007, 50: 2101–2106
- [9]. Chen, Z., Wu, W., Agarwal P. K. steam drying of coal. Part 1. Modeling the behavior of a single particle. *Fuel* 2000, 79: 961-973.
- [10]. Suvarnakuta, P., Devahastin, S., Soponronnarit, S., Mujumdar, A. S. Drying Kinetics and Inversion Temperature in a Low-Pressure Superheated Steam-Drying System. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 2005, 44: 1934-1941.
- [11]. Shibata, H. Drying Rate curves of porous solids in steam and in air under low-pressure conditions. *Drying Technology* 2006, 24: 37-43.
- [12]. Messai, S, Sghaier, J, Lecomte, D., Belghith, A. Drying kinetic of porous particle and the inversion temperature *Drying Technology*. 2008, 26;157-167
- [13]. Whitaker S., Heat and mass transfer in granular porous media. In *Advances in Drying*, volume 1, pages 23-61. Hemisphere, New-York, 1980
- [14]. Sghaier, J ; Jomaa, W., Belghith, A. Superheated steam drying of a spherical porous particle. *Journal of Porous Media*, 2008, 11(7), 633-646,

## ANNEXE

Les termes A1, A2 et A3 dans les équations (1, 2, 3) sont définis comme suit :

$$A1 = C \frac{\partial \langle P_v \rangle^g}{\partial X} - (\rho_l AL) \frac{\partial \langle P_c \rangle^g}{\partial X} \quad A2 = C \frac{\partial \langle P_v \rangle^g}{\partial T} - (\rho_l AL) \frac{\partial \langle P_c \rangle^g}{\partial T}$$

$$A3 = F - E, \quad E = \langle \rho_g \rangle^g D \langle P_v \rangle^g, \quad F = \langle \rho_v \rangle^g AG + \rho_l AL \quad AG = \frac{KK_g}{\mu_g}$$

Les termes H1, H2 et H3  $H1 = C \frac{\partial \langle P_v \rangle^g}{\partial X}, \quad H2 = C \frac{\partial \langle P_v \rangle^g}{\partial T}, \quad H3 = \langle \rho_a \rangle^g AG + E$

Les termes B1, B2 et B3:

$$B1 = \Delta H_{vap} C \frac{\partial \langle P_v \rangle^g}{\partial X} + \lambda_{eff} \quad B2 = \Delta H_{vap} C \frac{\partial \langle P_v \rangle^g}{\partial T} \quad B3 = \Delta H_{vap} (\langle \rho_v \rangle^g AG - E)$$