

Modélisation hydro-thermique d'un produit capillaro-poreux lors du séchage convectif à haute température

H.OTHMANI; L.HASSINI; A. EICAFSI

Laboratoire d'énergétique et des transferts thermique et massique. Faculté des sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, Campus Universitaire Manar II 2092, Tunis.

Othmani.hammouda@yahoo.fr

Résumé :

L'objectif de ce travail est de mettre en place un modèle interne de séchage à haute température d'un milieu capillaro-poreux. L'effet de la pression interne de la phase gazeuse a été parfaitement explicité, en particulier le transfert de liquide et de vapeur par filtration et l'expulsion du liquide à la surface. Ce modèle a été appliqué à un produit composé de sable et d'eau pure (remplissant une bouteille en verre) et validé par rapport aux courbes expérimentales de la teneur en eau moyenne et de la température au cœur du produit en fonction du temps. Le logiciel commercial "éléments finis" COMSOL Multiphysics a été utilisé, dans le mode 'PDE coefficient form', comme outil d'implémentation numérique du modèle. Le domaine de résolution a été maillé avec des éléments triangulaires fins et raffinés vers les frontières. Les variables d'état du produit, à savoir : l'humidité, la température et la pression interne de la phase gazeuse ont été simulés en fonction du temps et des coordonnées spatiales. Les niveaux de pression ont été interprétés en termes d'endommagement mécanique du produit.

Mots clés : séchage, modélisation, milieu capillaro-poreux, pression interne

1. Introduction

Il est généralement reconnu que dans un procédé industriel, l'étape de séchage est la plus consommatrice d'énergie. Pendant ces dernières années, vu l'augmentation du prix de l'énergie, des contraintes plus strictes sur la qualité, la pollution et la sécurité ont été imposées. Pour satisfaire ces exigences, améliorer le rendement énergétique et baisser le prix de revient du produit final, un effort de recherche théorique est constamment nécessaire. L'amélioration d'un procédé de séchage, directement à l'échelle industrielle, est difficile est très coûteuse. Des outils de simulation doivent se substituer aux essais à l'échelle industrielle. Le séchage à haute température peut autoriser une cinétique beaucoup plus rapide par rapport à un séchage basses et moyennes températures sans préjudice voire même parfois avec un gain du point de vue de la qualité (constant 1992). L'augmentation de la température du fluide séchant qui dépasse le point d'ébullition nécessite de prendre en compte le mouvement convectif de la phase gazeuse induit par le développement d'un gradient de pression totale de la phase gazeuse et la poussée directe qu'elle exerce sur les phases fluides du produit. Le transfert par perméation sous gradient de pression domine largement le transfert par diffusion sous gradient de concentration (Moyne et Martin 1982 ; Jodin, 1994 ; Johansson et al. 1997 ; Hukka 1999).

L'objectif de ce travail, est de mettre en place un modèle interne de séchage à haute température d'un milieu capillaro-poreux. L'effet de la pression interne de la phase gazeuse sur le transfert de liquide et de vapeur par filtration et l'expulsion du liquide à la surface a été parfaitement explicité. Ce modèle a été appliqué à un produit composé de sable et d'eau pure et validé par rapport aux courbes expérimentales de la teneur en eau moyenne et de la température au cœur du produit.

2. Présentation du modèle

2.1. Hypothèses générales

Pour simplifier la résolution numérique du modèle, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- le produit est un milieu homogène continu équivalent à l'échelle macroscopique,
- l'air et la vapeur d'eau sont des gaz parfaits,
- l'advection de la chaleur avec l'air et la vapeur est négligée,
- la capacité thermique de l'air et de la vapeur sont négligées.

2.2. Expressions de flux

En se basant sur les travaux de Constant et al. (1996), Perré et Turner (1997) et Salagnac et al. (2002), les expressions des différents flux s'écrivent:

• Phase gaz (air + vapeur d'eau):

$$n_{g} = n_{v} + n_{a} = -\frac{K_{g}^{eq}}{v_{g}} \operatorname{grad}P_{g}$$
(1)

• Vapeur d'eau:

$$\mathbf{n}_{v} = \left[-\frac{\mathbf{M}_{v}\mathbf{P}_{v}}{\mathbf{M}_{v}\mathbf{P}_{v} + \mathbf{M}_{a}(\mathbf{P}_{g} - \mathbf{P}_{v})} \frac{\mathbf{K}_{g}^{eq}}{\mathbf{v}_{g}} + \frac{\mathbf{M}_{v}\mathbf{D}_{v}^{eq}}{\mathbf{RT}} \frac{\mathbf{P}_{v}\mathbf{M}_{a}}{\mathbf{M}_{v}\mathbf{P}_{v} + \mathbf{M}_{a}(\mathbf{P}_{g} - \mathbf{P}_{v})} \right] \operatorname{grad}_{g}^{g} + \frac{\mathbf{M}_{v}\mathbf{D}_{v}^{eq}}{\mathbf{RT}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{a})}{\mathbf{M}_{v}\mathbf{P}_{v} + \mathbf{M}_{a}(\mathbf{P}_{g} - \mathbf{P}_{v})} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{X}} \right] \operatorname{grad}_{z}^{g} + \frac{\mathbf{M}_{v}\mathbf{D}_{v}^{eq}}{\mathbf{RT}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{a})}{\mathbf{M}_{v}\mathbf{P}_{v} + \mathbf{M}_{a}(\mathbf{P}_{g} - \mathbf{P}_{v})} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{X}} \right] \operatorname{grad}_{z}^{g} + \frac{\mathbf{M}_{v}\mathbf{D}_{v}^{eq}}{\mathbf{RT}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{a})}{\mathbf{M}_{v}\mathbf{P}_{v} + \mathbf{M}_{a}(\mathbf{P}_{g} - \mathbf{P}_{v})} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \right] \operatorname{grad}_{z}^{g} + \frac{\mathbf{M}_{v}\mathbf{D}_{v}^{eq}}{\mathbf{RT}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{a})}{\mathbf{M}_{v}\mathbf{P}_{v} + \mathbf{M}_{a}(\mathbf{P}_{g} - \mathbf{P}_{v})} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \right] \operatorname{grad}_{z}^{g} + \frac{\mathbf{M}_{v}\mathbf{D}_{v}^{eq}}{\mathbf{RT}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{a})}{\mathbf{M}_{v}\mathbf{P}_{v} + \mathbf{M}_{a}(\mathbf{P}_{g} - \mathbf{P}_{v})} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \right] \operatorname{grad}_{z}^{g} + \frac{\mathbf{M}_{v}\mathbf{D}_{v}^{eq}}{\mathbf{RT}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{v})}{\mathbf{M}_{v}\mathbf{P}_{v} + \mathbf{M}_{a}(\mathbf{P}_{g} - \mathbf{P}_{v})} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \right] \operatorname{grad}_{z}^{g} + \frac{\mathbf{M}_{v}\mathbf{D}_{v}^{eq}}{\mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{M}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{P}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{P}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{P}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_{v}}{\partial \mathbf{T}} \left(1 - \frac{\mathbf{P}_{v}(\mathbf{M}_{v} - \mathbf{P}_{v})}{\mathbf{T}} \right) \frac{\partial \mathbf{P}_$$

• Air:

$$n_{a} = \left[-\frac{M_{a}(P_{g} - P_{v})}{M_{v}P_{v} + M_{a}(P_{g} - P_{v})} \frac{K_{g}^{eq}}{v_{g}} - \frac{M_{v}D_{v}^{eq}}{RT} \frac{P_{v}M_{a}}{M_{v}P_{v} + M_{a}(P_{g} - P_{v})} \right] \operatorname{grad}P_{g} + \left[\frac{M_{v}D_{v}^{eq}}{RT} \left(1 - \frac{P_{v}(M_{v} - M_{a})}{M_{v}P_{v} + M_{a}(P_{g} - P_{v})} \right) \frac{\partial P_{v}}{\partial X} \right] \operatorname{grad}X + \left[\frac{M_{v}D_{v}^{eq}}{RT} \left(1 - \frac{P_{v}(M_{v} - M_{a})}{M_{v}P_{v} + M_{a}(P_{g} - P_{v})} \right) \frac{\partial P_{v}}{\partial T} \right] \operatorname{grad}T \right]$$

$$(3)$$

• Phase liquide (eau liquide):

$$n_{1} = -\frac{K_{1}^{eq}}{v_{1}} \operatorname{grad} P_{g} + \frac{K_{1}^{eq}}{v_{1}} \frac{\partial P_{c}}{\partial X} \operatorname{grad} X + \frac{K_{1}^{eq}}{v_{1}} \frac{\partial P_{c}}{\partial T} \operatorname{grad} T$$
(4)

• Chaleur:

$$\rho_0 C_p^{eq} \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda^{eq} \operatorname{grad} T) - (n_a C_{pa} + n_v C_{pv} + n_1 C_{pl}) \operatorname{grad} T - \Delta h_{tot} \dot{m}_{vap}$$
(5)

2.3. Conditions initiales et aux limites

Conditions initiales:

 $T = T_0$; $X = X_0$; $P_g = P_{atm}$

Conditions aux limites:

• Transfert d'eau :

$$(\mathbf{n}_{1} + \mathbf{n}_{v})\big|_{\text{surf}} = k \frac{\mathbf{P}_{\text{atm}} \mathbf{M}_{v}}{\mathbf{R} \mathbf{T}_{a}} \ln \left(\frac{\mathbf{P}_{\text{atm}} - \mathbf{P}_{va}}{\mathbf{P}_{\text{atm}} - \mathbf{P}_{vsurf}} \right) + \mathbf{n}_{1}^{\text{adv}}\big|_{\text{surf}} \qquad \text{et} \qquad \mathbf{n}_{1}^{\text{adv}}\big|_{\text{surf}} = -\frac{\mathbf{K}_{1}^{\text{eq}}}{\mathbf{v}_{1}} \frac{\partial \mathbf{P}_{g}}{\partial \mathbf{n}}\Big|_{\text{surf}}$$
(6)

• Transfert de chaleur :

$$\lambda^{eq} \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{surf} + \Delta h_{vap}(n_t - n_l^{adv})\Big|_{surf} + c_{pl} T_{surf} n_l^{adv}\Big|_{surf} = h(T_a - T_{surf})$$
(7)

• Transfert de la phase gaz : $P_{gsurf} = P_{atm}$

3. Implémentation numérique

Le modèle mathématique décrit ci-dessus a été résolu numériquement dans un cas tridimensionnel et pour une géométrie particulière, rapprochée à une bouteille (Figure 1a). En raison de la symétrie du problème, la résolution est effectuée sur un huitième du domaine réel (voir figure 1b). Le logiciel commercial "éléments finis" COMSOL Multiphysics (version 3.3a) a été utilisé, dans le mode 'PDE coefficient form', comme outil d'implémentation numérique du modèle.



4. Résultats et discussion

4.1. Validation par rapport aux expériences de séchage

Afin de valider le modèle mathématique proposé, des expériences de séchage ont été réalisées sur du sable humide, remplissant une bouteille en verre de grande résistance thermique (hauteur 6 cm, diamètre de base 4 cm et avec une petite ouverture de 1,5 cm de diamètre au niveau du centre de la base supérieure). Cette configuration est très proche technologiquement au procédé de fabrication des composantes électroniques et différents types de briques et enveloppes des pièces métalliques. Ces pièces sont à base de sable humide et subissent généralement un séchage à haute température. Pour préparer l'échantillon à sécher, le sable sec a été versé dans la bouteille à l'aide d'un entonnoir. Le sable à été ensuite tassé manuellement avec des petites vibrations (petits coups sur la table) pendant 5 min, puis mesure du poids. Cette opération est renouvelée jusqu'à obtenir le même poids entre deux périodes de tassement. Le sable sec entassé est en fin imprégné par l'eau goutte à l'aide d'un seringue graduée jusqu'à la saturation du trou puis laisser 30 min pour que l'humidité devient uniforme dans le produit. La pièce est ensuite mise sur une grille perforée pour séchage. L'unité de séchage utilisée est une boucle fermée disponible dans le laboratoire LETTM. La validation du modèle a porté sur la comparaison entre les courbes de cinétiques de séchage (perte de poids et température au cœur du produit en fonction du temps) expérimentales et simulées. Tous les résultats de validation sont représentés sur la figure 2.

D'après les résultats présentés, l'accord est raisonnable entre l'expérience et la simulation. Les écarts constatés peuvent être attribués en partie au cumul des imperfections du banc d'essais, plus

spécialement aux vibrations du support induites par le courant d'air et à l'imprécision due au positionnement du thermocouple dans l'échantillon. Les hypothèses simplificatrices du modèle ainsi que le grand nombre des paramètres physiques, qui sont prises de la littérature, peuvent aussi expliquer ces divergences.



température au cœur (b) de l'échantillon

4.2. Simulation de l'état hydro-thermique

La simulation numérique nous permet d'obtenir les profils internes de chaque variable d'état (température, humidité et pression) dans la pièce. La prévention des variables en trois points particuliers (fond, milieu et trou), est très intéressante pour mieux comprendre les phénomènes physiques qui se produisent au cours du procédé.

4.2.1. Profils d'humidité

L'évolution temporelle de la teneur en eau en trois points différents du produit est présentée sur la figure 3. La distribution de la teneur en eau dans le produit au début (après 0.5h) et à la fin du séchage (après 2h) est présentée sur la figure 4. On note une inversion du gradient hydrique en fonction du temps. Ceci est expliqué par le fait, qu'au début de séchage l'eau part au niveau du trou sous forme liquide "ruissellement", induit par la forte pression interne et qu'à la fin du séchage les transferts d'humidité s'effectuent uniquement par convection.



4.2.2. Profils de température

2h de séchage

La courbe d'évolution temporelle de la température en trois points différents du produit est présentée sur les figures 5. La distribution de la température au début et à la fin du séchage est présentée sur la Figure 6. On constate l'existence d'un gradient thermique entre le fond et le trou de la pièce. Ce gradient s'estompe en fonction du temps de séchage. En effet, dans un procédé de séchage, les transferts de chaleur et de masse sont couplés. Le départ de l'eau à la surface du produit atténue fortement l'hétérogénéité de température qui résulte de l'apport thermique à la surface. En effet, la température de la pièce augmente progressivement à partir de sa valeur initiale, passe par un palier au voisinage de 100°C correspondant au phénomène de transition de la phase liquide à la phase gaz. A la fin du séchage, la température augmente progressivement pour rejoindre celle de la veine.



Figure 6: Distribution de la température à 0.5h et 2h de séchage

4.2.3. Profils de la pression totale de la phase gazeuse

Les profils de la pression interne de la phase gazeuse dans le produit sont présentés sur les figures 7 et 9. On remarque que le gradient de pression est relativement important par rapport aux gradients d'humidité et de température, ce qui montre que le transfert d'eau (vapeur et liquide) par filtration domine largement le transfert par diffusion sous gradient de concentration pour un séchage à haute température (constant et al., 1996, Perré et Turner, 1997). La figure 7 montre que la pression augmente en fonction du temps sous l'effet de vaporisation interne de l'eau, et entraine l'expulsion du liquide par la frontière perméable de l'échantillon (phénomène observé expérimentalement). Après un maximum, la pression diminue du fait que l'eau libre se fait rare et arrive difficilement à la surface de l'échantillon et la perméabilité à la phase gazeuse augmente. Le niveau des pressions maximales est comparables à ceux simulés par Perré et Turner (1999) dans le cas du séchage convectif d'une pièce parallélépipédique du bois à 140°C et nettement supérieures aux pressions simulées par constant et al. (1996) pour un séchage micro-ondes à 65 kW d'une pièce cylindrique de béton type 'Ytong'.

En supposant que l'apparition des fissures dans le produit est conditionnée par la surpression du mélange gazeux air/vapeur au sein de l'échantillon (Hassini et al., 2012), l'état mécanique du produit peut être ainsi évalué à l'aide des courbes de pression.

D'après ces courbes, le niveau de pression maximum est atteint dans la partie inférieure de la pièce. La contrainte mécanique (induite par une augmentation violente de la pression dans les pores) la plus forte est située ainsi dans la partie inférieure de l'échantillon est signifie que le risque de fissuration affecte uniquement cette zone. De plus, le niveau de pression atteint son maximum au début de séchage, le phénomène de fissuration, si elle existe, est très probable à se produire au début du procédé. D'après la figure 8 on remarque que le niveau de pression dépend fortement de la température de séchage. Plus le séchage est dur, plus l'intensité de pression est importante, traduisant une contrainte plus importante dans la pièce.



Figure 8 : Evolution temporelle de la pression au

centre de l'échantillon pour différentes

Figure 7: Evolutions temporelles de la pression dans le produit



Figue.9: Distribution de la pression à 0.5h et 2h de séchage

5. Conclusion

Un modèle interne de séchage, basé sur les équations de transfert de matière et de chaleur et les équations d'équilibre thermodynamique et mécaniques des fluides a été mis en place. Le phénomène de ruissellement de l'eau liquide à la surface (induit par l'évaporation intense de l'eau) au début de séchage, qui a nécessité des changements substantiels par rapport au modèle classique de type diffusionnel a été pris en compte. La comparaison entre les résultats expérimentaux et simulées était satisfaisante. Partant de cette validation, les profils d'humidité, de température et de pression interne dans la pièce ont étés simulés et interprétés en termes d'optimisation du procédé sur la base du coût énergétique et de la qualité mécanique du produit fini.

NOMENCLATURE

c _{pl} Dv	Capacité thermique massique du liquide $[J. \mathbf{kg^{-1}} . \mathbf{K^{-1}}]$ Diffusivité hydrique équivalente en phase vapeur du produit	[[m] ¹ 2	י (.s)	u Vites †(-1)	sse [m. ^g [−]] V v	¹] volume
Ha /k	Enthalpie massique de la composante i [J.**]			Χ	Teneur en	eau base seche
HR F	g Jumidité relative de l'air [%]			Lettr	es grecques	5
K <mark>éq</mark> I	Perméabilité équivalente du produit à la phase liquide [m ²]	λ^{eq} Cond	luctivité	thermic	que équivale	ente du produit
[W. m	⁻¹ .k ⁻¹]					
K ^{éq} g	Perméabilité équivalente du produit à la phase gaz [m ²]		ρ_{i}	Masse	volumique	[kg. m⁻³]
$\dot{m}_{_{vap}}$	Quantité d'eau évaporée par unité de volume et de temps [kg.	$m^3.s$]	v_1	Viscos	sité cinémati	que du liquide
$[m^2.s]$	¹]					

M _a Masse molaire de l'air [kg.mol ⁻¹]	v_g Viscosité cinématique du gaz $[m^2.s^{-1}]$	v_{g} Viscosité cinématique du gaz $[m^{2}.s^{-1}]$			
M_v Masse molaire de la vapeur [kg.mol ⁻¹]	Δh_{vap} Enthalpie de vaporisation de l'ea	u			
[J. kg ⁻¹]					
n_{α} Flux d'air [kg. m^{-2} . s^{-1}]	Indices				
n l Flux du liquide [kg.m ⁻² .s ⁻¹]	0 Initial(e)				
n_v Flux de la vapeur [kg.m ⁻² .s ⁻¹]	a Air				
ⁿ g Flux de la phase gaz [kg.m ⁻² .s ⁻¹]	éq Equilibre				
p Pression [Pa]	g Gaz				
p _e Pression capillaire [Pa]	l Liquide				
pg Pression totale de la phase gaz [Pa]	v Vapeur				
Pv Pression de la vapeur [Pa]	<u>Abréviations</u>	Abréviations			
P1 Pression du liquide [Pa]					
Presurf Pression de vapeur à la surface [Pa]	adv advection				
Patm Pression atmosphérique [Pa]	atm atmosphérique				
R Constante des gaz parfaits [J.mol ⁻¹ .k ⁻¹]	surf surface				
T Température $[C^{\circ}, k]$					

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Constant T., C. Moyne et P. Perré (1996). Drying with internal heat generation: theoretical aspects and application to microwave heating, AIChE Journal, 42(2), 359-368.

[2] Hassini Lamine, Peczalski Roman et Gelet Jean-Louis (2012). Combined convective and microwave drying of Agglomerated Sand Internal transfer modeling with the gaz pressure effect. Publication accepté dans Drying Technology Journal.

[3] Hukka, A. (1999). The effective diffusion coefficient and mass transfer coefficient of Nordic softwoods as calculated from direct drying experiments. Holzforschung, 53, 534-540.

[4] Jodin, A. (1994). Le bois, matériau d'ingénierie, A.R.Bo.Lor. éditeur, 201-287.

[5] Johansson, A., C. Fyhr et A. Rasmuson (1997). High temperature convective drying of wood chips with air and superheated steam. Int. J. Heat Mass Transfer, 40, 2843-2858.

[6] Moyne, C., et M. Martin (1982). Étude expérimentale du transfert simultané de chaleur et de masse au cours du séchage par contact sous vide d'un bois résineux. Int. J. Heat Mass Transfer, 25, 1839-1848.

[7] P. Salagnac, P. Glouannec, D. Lecharpentier (2002). Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying. International Journal of Heat and Mass Transfer 47, 4479–4489.

[8] Perré P. et W. Turner (1997). Microwave drying of softwood in an oversized waveguide: theory and experiment, AIChE Journal, 43(10), 2579-2586.

[9] Perré, P. et I. Turner (1999). A 3D version of TransPore: A comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. Int. J. Heat Mass Transfer, 42, 4501–4521.