



MODELISATION ET SIMULATION DU COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE D'UN MATERIAU BIO- SOURCE ARGILO- CELLULOSIQUE LORS DU SECHAGE CONVECTIF

Haifa ELOMRANI, Lamine HASSINI et Afif EICAFSI

Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique.
Faculté des sciences de Tunis –Université de Tunis EL Manar, Campus Universitaire, 2092, Manar II, Tunis,
Tunisie.

Omranihaiifa90@gmail.com

hassini_lamine@yahoo.fr

afif.elcafsi@fst.rnu.tn

Résumé :

L'objectif de ce travail, est d'optimiser le procédé de séchage convectif d'un composite argilo-cellulosique. La procédure d'optimisation a été basée sur le développement d'un modèle 2D décrivant le séchage des milieux capillaro-poreux humides non saturés (triphase) avec une squelette solide déformable dont le comportement mécanique est supposé visco-élastique. Appliqué à un échantillon long et de section carrée d'un composite argilo-cellulosique, ce modèle permet de simuler les distributions de la teneur en eau, de la température, de la pression totale de la phase gazeuse et de la contrainte mécanique au sein de l'échantillon en cours de séchage. Les équations ont été implémentées numériquement à l'aide d'un solveur commercial 'Comsol Multiphysics'.

Ce modèle peut constituer un outil d'optimisation du séchage des milieux non saturés déformables, en évitant les éventuelles fissurations qui se produisent dans tels produits en cours du procédé. Ces fissurations qui, si elles dépassent un certain seuil, rendent les produits impropres à la distribution.

La validation du modèle a été effectuée sur la base d'une comparaison des cinétiques de séchage simulées à celles obtenues expérimentalement à différentes conditions. Le but de la simulation est donc d'optimiser l'opération de séchage dont l'objectif est de réduire la durée du procédé en risque d'endommagement du matériau.

Mots clés :

Composite argilo-cellulosique, Séchage convectif, Modèle capillaro-poreux, simulation numérique.

1. Présentation du modèle

Le modèle hydro-thermique proposé est basé essentiellement sur les équations de Constant et al. 1996[1]; Perré et Turner 1997[2]; Salagnac et al. 2004[3] et Whitaker 1977[4]. Les équations de base ont été modifiées pour avoir un problème physiquement bien posé et adopté à notre produit d'étude.

Le couplage hydromécanique entre transport du fluide et contraintes mécaniques a été assuré à l'aide d'une décomposition du tenseur des contraintes en utilisant le principe de contraintes effectives de Bishop (Verbrugge et Fleureau, 2002[5]). Cette expression fait apparaître explicitement les pressions intrinsèques du liquide et de la phase gaz.

1.1 Principales hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices générales utilisées pour simplifier l'implémentation numérique du modèle sont les suivantes :

- Le produit est un milieu homogène continu équivalent à l'échelle macroscopique ;
- Le transfert de la phase gaz par gravité est négligé ;
- 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 ;

- Le comportement viscoélastique linéaire du matériau est représenté par le modèle de Maxwell généralisé à cinq éléments;
- La déformation est 'plane' en (x, y),
- Il n'y a pas de déformation totale (mesurable) dans la direction longitudinal (z).

1.2 Expression de flux

- Phase solide :
$$\vec{n}_s = c_s \vec{u}_s \quad (1)$$

Où :

- c_s est la concentration du solide dans le produit :

$$c_s = \frac{m_s}{V_t} : \text{Variable à cause de la déformation du produit en cours de séchage}$$

- \vec{u}_s est la vitesse du solide

- Phase liquide (eau liquide) : transfert par perméation (loi de Darcy) :

$$\vec{n}_l = c_l \vec{u}_l = c_l \vec{u}_s - \frac{K_l^{eq}}{\nu_l} \overrightarrow{\text{grad}P_l} \quad (2)$$

Où

- K_l^{eq} est la perméabilité équivalente du produit à la phase liquide, ν_l est la viscosité du liquide et \vec{u}_l est la vitesse de filtration du liquide

- c_l est la concentration de l'eau liquide dans le produit :

$$c_l = \frac{m_l}{V_t} = c_s X \quad (3)$$

Par ailleurs, $P_l = P_g - P_c$; l'équation précédente peut alors se réécrire :

$$\vec{n}_l = c_s X \vec{u}_s - \frac{K_l^{eq}}{\nu_l} \overrightarrow{\text{grad}(P_g - P_c)} \quad (4)$$

La pression capillaire P_c fonction de X et T :

$$\overrightarrow{\text{grad}P_c} = \frac{\partial P_c}{\partial X} \overrightarrow{\text{grad}X} + \frac{\partial P_c}{\partial T} \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (5)$$

- Phase gaz (air + vapeur d'eau) : transfert par perméation (loi de Darcy) :

$$\vec{n}_g = \vec{n}_v + \vec{n}_a = c_g \vec{u}_s - \frac{K_g^{eq}}{\nu_g} \overrightarrow{\text{grad}P_g} \quad (6)$$

Où K_g^{eq} est la perméabilité équivalente du produit à la phase gaz et ν_g est la viscosité du gaz.

- Vapeur d'eau : transfert par diffusion (loi de Fick pour un gaz binaire) et advection (entraînement par la phase gaz) :

$$\vec{n}_v = \omega_v^g \vec{n}_g - \rho_g D_v^{eq} \overrightarrow{\text{grad}\omega_v^g} \quad (7)$$

Où :

- ω_v^g est la fraction massique de la vapeur dans la phase gaz :

$$\omega_v^g = \frac{m_v}{m_g} = \frac{c_v^g}{\rho_g} = \frac{M_v P_v}{M_v P_v + M_a (P_g - P_v)} \quad (8)$$

- ρ_g est la densité (masse volumique) de la phase gaz, additivité de la masse :

$$\rho_g = \frac{m_g}{V_g} = \frac{m_v + m_a}{V_g} = c_v^g + c_a^g = \frac{M_v P_v + M_a (P_g - P_v)}{RT} \quad (9)$$

- D_v^{eq} est la diffusivité hydrique équivalente en phase vapeur du produit

- c_v^g est la concentration de la vapeur dans la phase gaz, équation d'état de gaz parfait :

$$c_v^g = \frac{m_v}{V_g} = \frac{M_v P_v}{RT} \quad (10)$$

- c_a^g est la concentration de l'air dans la phase gaz, équation d'état de gaz parfait :

$$c_a^g = \frac{m_a}{V_g} = \frac{M_a P_a}{RT} = \frac{M_a (P_g - P_v)}{RT} \quad (11)$$

P_v fonction de X et T :

$$\overrightarrow{\text{grad}P_v} = \frac{\partial P_v}{\partial X} \overrightarrow{\text{grad}X} + \frac{\partial P_v}{\partial T} \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (12)$$

• Air : transfert par diffusion (loi de Fick pour un gaz binaire) et advection (entraînement par la phase gaz):

$$\vec{n}_a = \omega_a^g \vec{n}_g - \rho_g D_v^{eq} \overrightarrow{\text{grad}\omega_a^g} = \omega_a^g \vec{n}_g + \rho_g D_v^{eq} \overrightarrow{\text{grad}\omega_v^g} \quad (13)$$

Avec :

- ω_a^g est la fraction massique de l'air dans la phase gaz :

$$\omega_a^g = \frac{m_a}{m_g} = \frac{c_a^g}{\rho_g} = \frac{M_a (P_g - P_v)}{M_v P_v + M_a (P_g - P_v)} \quad (14)$$

• Chaleur

Transfert par conduction (loi de Fourier) et advection (entraînement par les phases fluides) :

$$\mathbf{q} = -\lambda^{eq} \overrightarrow{\text{grad}T} + n_a h_a + n_v h_v + n_l h_l + n_s h_s \quad (15)$$

1.3 Equations de bilan

• Air

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} = -\text{div}\vec{n}_a \quad (16)$$

c_a est la concentration de l'air dans le produit, additivité des volumes :

$$c_a = \frac{m_a}{V_t} = \phi_g \frac{m_a}{V_g} = (\phi - \phi_l) c_a^g = (\phi - X \frac{c_s}{\rho_l}) \frac{M_a (P_g - P_v)}{RT} \quad (17)$$

Avec :

- ϕ est la porosité (ou fraction volumique de vide) totale du produit (porosité du produit sec) :

$$\phi = \frac{V_l + V_g}{V_t} = \phi_l + \phi_g = X \frac{c_s}{\rho_l} + \phi_g \quad (18)$$

ϕ est variable à cause de la déformation du produit en cours de séchage. Par ailleurs, la porosité totale peut être reliée à la porosité à l'état initiale par l'équation de conservation de la masse solide, qui ne doit pas changer en cours de procédé :

$$\rho_s V (1 - \phi) = \rho_s V_o (1 - \phi_o) \quad (19)$$

Avec ρ_s est la masse volumique apparente du solide sec.

Soit :

$$\phi = 1 - \frac{1 - \phi_o}{V / V_o} \quad (20)$$

(V/V_o) fonction de X et peut être déterminé expérimentalement

D'après la relation (17),

$$c_a = c_a(X, Y, T, P_g)$$

et donc :

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} = \frac{\partial c_a}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial c_a}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial c_a}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial t} \quad (21)$$

• Vapeur d'eau

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} = 0 = -\text{div}\vec{n}_v + \dot{m}_{vap}$$

(22)

• Solide :

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = -\text{div}(c_s \vec{u}_s) \quad (23)$$

• Eau liquide :

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = -\text{div} \vec{n}_l - \dot{m}_{vap} \quad (24)$$

Avec \dot{m}_{vap} Quantité d'eau évaporée dans le produit par unité de volume et de temps

• Eau totale (liquide + vapeur):

L'addition des relations (22) et (24) conduit à l'équation globale pour l'eau :

$$\frac{\partial}{\partial t} (c_l + c_v) = \frac{\partial c_l}{\partial t} = X \frac{\partial c_s}{\partial t} + c_s \frac{\partial X}{\partial t} = -\text{div}(c_l \vec{u}_s - \frac{K_l^{eq}}{v_l} \overrightarrow{\text{grad} P_l} + \vec{n}_v) \quad (25)$$

Par ailleurs, d'après la relation (3), $c_l = Xc_s$ et donc :

$$\text{div}(Xc_s \vec{u}_s - \frac{K_l^{eq}}{v_l} \overrightarrow{\text{grad} P_l} + \vec{n}_v) = \text{div}(Xc_s \vec{u}_s) = X \text{div}(c_s \vec{u}_s) + c_s \vec{u}_s \overrightarrow{\text{grad} X} \quad (26)$$

En tenant compte de l'équation de conservation de la masse solide (23), l'équation (26) s'écrit encore :

$$c_s \frac{\partial X}{\partial t} = \text{div}(\frac{K_l^{eq}}{v_l} \overrightarrow{\text{grad} P_l} + \vec{n}_v) - c_s \vec{u}_s \overrightarrow{\text{grad} X} \quad (27)$$

• Chaleur :

$$\frac{\partial}{\partial t} (c_a h_a + c_v h_v + c_l h_l + c_s h_s) = -\text{div} q \quad (28)$$

En négligeant l'advection de la chaleur par l'air et la vapeur d'eau, on obtient :

$$(c_s C_{ps} + c_l C_{pl}) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda^{eq} \overrightarrow{\text{grad} T}) - \vec{n}_l C_{pl} \overrightarrow{\text{grad} T} - \vec{n}_s C_{ps} \overrightarrow{\text{grad} T} - \Delta h_{tot} \dot{m}_{vap} \quad (29)$$

Ces différentes expressions de flux ont été obtenues après certaines opérations mathématiques.

1.4 Equations mécaniques

Le modèle mécanique repose principalement sur l'équation d'équilibre mécanique (30). Dans le cas où les termes d'inertie ainsi que les effets de la gravité sont négligeables, cette équation s'écrit :

$$\nabla(\sigma_{ij}) = 0 \quad (30)$$

Dans les milieux poreux, on remplace souvent la contrainte par la contrainte effective issue de la théorie de Bishop, théorie fortement recommandée dans la littérature par des auteurs reconnus pour leurs travaux concernant le couplage hydromécanique dans des milieux saturés, telles que (Biot, 1941[6]) et (Verbrugge et Fleureau, 2002[5]). Selon cette théorie, la contrainte totale est la somme de la contrainte solide 'effective' ($\sigma_{ij,s}$), la contrainte liquide ($\sigma_{ij,l}$) et la contrainte du gaz ($\sigma_{ij,g}$) :

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij,s} + \sigma_{ij,l} + \sigma_{ij,g} \quad (31)$$

Les contraintes partielles du liquide et de la phase gaz s'écrivent :

$$\sigma_{ij,l} = -SP_l \quad \text{et} \quad \sigma_{ij,g} = -(1-S)P_g \quad (32)$$

$\sigma_{ij,s}$ est la contrainte effective qui est la contrainte responsable de la déformation du réseau solide dans son ensemble.

L'équation du comportement viscoélastique utilisée est celle développée par Rao et al. 1975[7] et utilisée dans plusieurs travaux antérieurs (Itaya et al., 2001[8]; Mercier, 1996[9]).

Dans l'équation du comportement visco-élastique, les paramètres du matériau visco-élastique dépendent du temps et de la teneur en eau:

$$\sigma_{ij,s}(t, X) = \int_0^t (K(t-\tau, X) - \frac{2}{3}G(t-\tau, X)) \frac{\partial \varepsilon_{ij}^m(\tau)}{\partial \tau} \delta_{ij} d\tau + 2 \int_0^t G(t-\tau, X) \frac{\partial \varepsilon_{ij}^m(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (33)$$

G et K sont respectivement les modules de cisaillement (ou de rigidité) et le module de déformation (ou de compression), et ont pour expressions :

$$G(t, X) = \frac{E(t, X)}{3(1-2\nu)} \quad \text{et} \quad K(t, X) = \frac{E(t, X)}{2(1+\nu)} \quad (34)$$

E(t, X) est le module de relaxation appelé aussi le module d'élasticité instantané, déterminée expérimentalement pour cette étude, ν est le coefficient de Poisson et t est le temps de séchage 'actuelle' et δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

La déformation totale ε_{ij} , est la somme d'une déformation mécanique ε_{ij}^m (déformation due à la viscoélasticité) et une déformation hydrique (déformation due à la perte d'eau et proportionnelle à la teneur en eau), exprimée par l'équation suivante (Yang et al., 2001[10]; Kowalski, 1996[11]):

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^m + \varepsilon_{ij}^h = \varepsilon_{ij}^m + \alpha(X - X_0) \delta_{ij} \quad (35)$$

Les équations mécaniques ci-dessus sont résolues non pas en terme de déformation (ε) mais en terme de déplacement (u) dans les directions x et y.

La relation entre la déformation totale, le déplacement et la vitesse du solide, sous l'hypothèse des petites déformations, s'écrit :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (36)$$

La vitesse du solide est supposée égale à la vitesse du produit

$$v_s^i = \frac{\partial u_i}{\partial t} \quad (37)$$

Toute variation spatiale de la teneur en eau non uniforme induit un champ de retrait différentiel au sein du matériau. Ce champ de retrait engendre un champ de contrainte interne et donc une déformation complémentaire.

La somme de ces déformations complémentaires ε_{ij}^m et de retrait ε^r doit vérifier les équations de compatibilités pour que la déformation totale ε soit cinématiquement admissible.

1.5 Récapitulation du système d'équations à résoudre

Pour déterminer les quatre variables choisies T, X, \dot{m}_{vap} et P_g , cinq équations de bilan sont nécessaires :

$$\begin{aligned} & * \frac{\partial c_s}{\partial t} = -\text{div}(c_s \vec{u}_s) \\ & * (c_s C_{ps} + c_l C_{pl}) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda^{eq} \overrightarrow{\text{grad}T}) - \vec{n}_l C_{pl} \overrightarrow{\text{grad}T} - \vec{n}_s C_{ps} \overrightarrow{\text{grad}T} - \Delta h_{tot} \dot{m}_{vap} \\ & * c_s \frac{\partial X}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{K_l^{eq}}{v_l} \overrightarrow{\text{grad}P_l} + \vec{n}_v \right) - c_s \vec{u}_s \overrightarrow{\text{grad}X} \\ & * \frac{\partial c_a}{\partial t} = -\text{div} \vec{n}_a \\ & * \dot{m}_{vap} = \text{div} \vec{n}_v \\ & * \nabla(\sigma_{ij}) = 0 \end{aligned}$$

1.6. Conditions aux limites

Le système d'équations du paragraphe 1.5 doit être complété, pour être solvable, par les conditions initiales et les conditions aux limites.

- Sur la face exposée à l'air de l'étuve (perméable), les conditions aux limites (équations de transfert à l'interface produit/air ambiant) s'écrivent :

Transfert d'eau :

$$(n_l + n_v)|_{surf} = k \frac{P_{atm} M_v}{RT_a} \ln \left(\frac{P_{atm} - P_{va}}{P_{atm} - P_{vsurf}} \right) \quad (38)$$

Transfert de chaleur :

$$\lambda^{eq} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{surf} + \Delta h_{vap} n_l|_{surf} = h(T_a - T_{surf}) \quad (39)$$

Transfert de la phase gaz :

$$P_g^{surf} = P_{atm} \quad (40)$$

- La seule source de déformations est le départ de l'eau évaporable : il n'y a pas de forces extérieures appliquées à la surface du produit. La condition aux limites naturelle pour la conservation de la quantité de mouvement totale est :

$$\sigma_{ii}^{surf} = 0 \quad (41)$$

- A l'état initial, la température et l'humidité de l'échantillon sont uniformes, la pression totale de la phase gaz égale à la pression atmosphérique et la contrainte est nulle,

Les conditions initiales (les valeurs des variables au temps 0) s'écrivent :

$$T = T_0 ; X = X_0 ; P_g = P_{atm} ; \sigma_{ij} = 0 \quad (42)$$

1.7 Implémentation numérique des équations

Les équations ont été résolues numériquement en 2D, en utilisant un solveur commercial (COMSOL Multiphysics, version 3.5a) travaillant avec la méthode des éléments finis. Cette méthode est capable de suivre l'évolution de la géométrie du matériau au cours du séchage. Par ailleurs, le logiciel utilisé est capable de tenir compte de toutes les exigences de notre modèle en termes d'implémentation numérique. Une autre raison qui justifie ce choix, est le fait que l'objectif principal de notre travail est de mieux comprendre la physique du séchage d'un milieu poreux déformable et non d'approfondir les méthodes de résolution numérique.

En raison de la symétrie du problème (voir Figure1), nous avons limité le calcul numérique à la moitié (5mmx10mm) d'une section représentative de l'échantillon. Le domaine de résolution a été maillé avec des éléments triangulaires très raffinés vers les frontières. Le solveur direct (UMEPACK) a été utilisé pour la résolution numérique des équations.

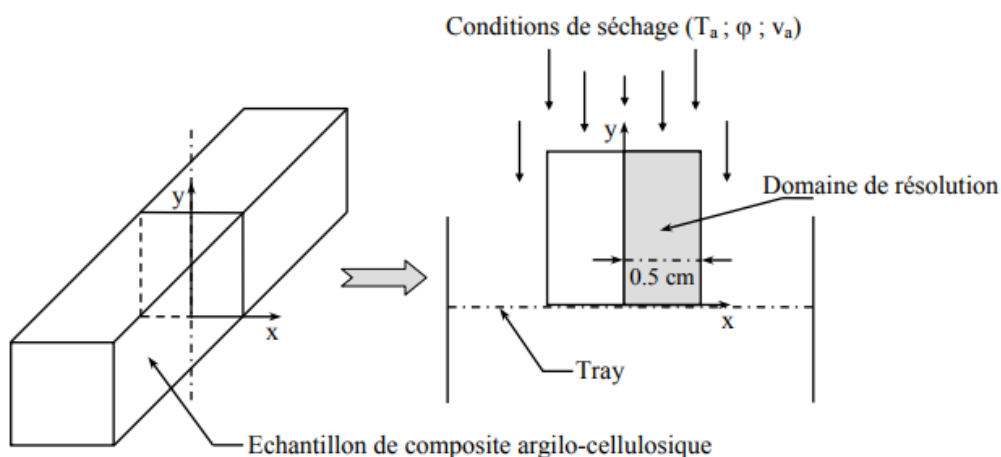


Figure 1 : Orientation de l'échantillon dans le séchoir et domaine de résolution numérique

Les propriétés thermo-physiques et mécaniques (constantes et expressions) utilisées dans le modèle ont été déterminées expérimentalement.

2. Validation du modèle et simulation des paramètres d'état

2.1 Validation par rapport aux expériences de séchage

La validation du modèle est réalisée en comparant la cinétique (évolution temporelle de la teneur en eau moyenne d'un échantillon) obtenue à partir de l'expérience à ceux de la simulation numérique. En effet cette confrontation montre que les résultats de la simulation numérique sont en bon accord avec ceux des expériences (Figure 2).

Les décalages constatés peuvent être attribués à la connaissance non précise de certains paramètres de transport du matériau en particuliers les perméabilités relatives du produit à la phase liquide et gaz. En effet, le fort couplage qui existe entre les équations amène à un modèle très sensible à la variation de n'importe quelle variable, ceci nous oblige à avoir les fonctions phénoménologiques et les données exactes des paramètres intervenants. Les imperfections du banc d'essais, plus spécifiquement les vibrations du support induites par le courant d'air peuvent aussi expliquer ces petites divergences.

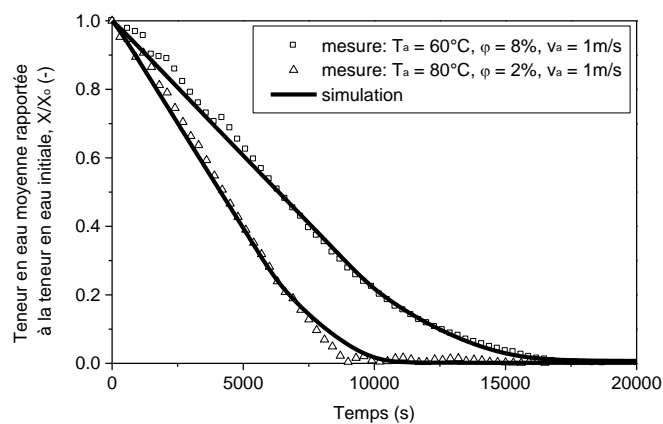


Figure 2 : Comparaison entre les teneurs en eau moyennes simulées et expérimentales

2.2 Simulation des variables (variables macroscopiques) d'état du matériau

Les variables dépendants choisies pour représenter l'état du produit sont : la teneur en eau base sèche : X (kg eau/kg ms), la température : $T(^{\circ}\text{C})$, - la pression de la phase gazeuse : P_g et la contrainte mécanique (viscoélastique) : MPa

2.2.1 Profils de la teneur en eau et de la température

Sur la figure 3 sont portées les évolutions des teneurs en eau de quatre points de l'échantillon. Les résultats sont classiques : la surface sèche plus vite que le cœur du matériau. Dans la première partie du séchage, les écarts entre les quatre courbes sont pratiquement confondus : en effet l'eau évacuée des zones proches de la surface est compensée par l'eau s'écoulant du cœur vers la surface sous l'effet des importants gradients de pression de la phase gaz (termes moteur de l'écoulement). Dans la deuxième partie du séchage, les courbes se dispersent, ceci peut s'expliquer par le fait, que dans cette deuxième période de séchage, l'eau libre commence à se faire rare et donc les transferts deviennent purement diffusifs (sous effet d'un gradient d'humidité).

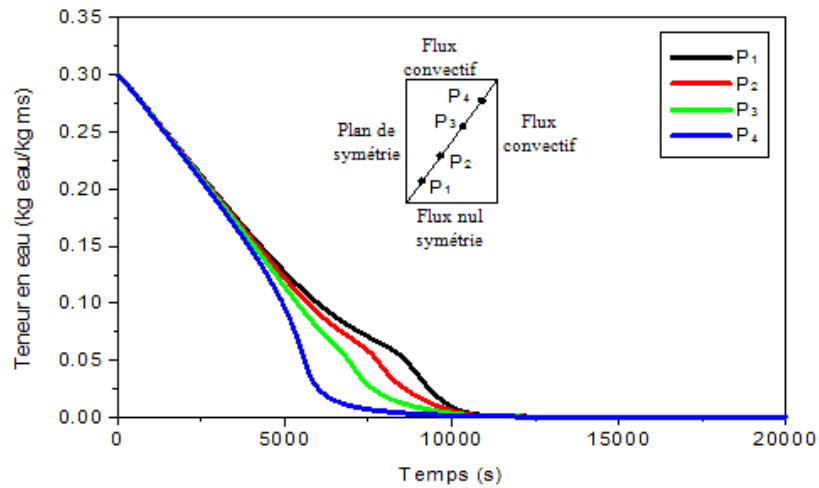


Figure 3 : Evolution des teneurs en eau en quatre points de l'échantillon

L'évolution des températures aux quatre points de l'échantillon est portée dans la figure 4. L'allure est classique et les trois phases de la cinétique de séchage sont présentes : une phase de préchauffage où la température augmente pour se stabiliser à la température humide de l'air puis elle augmente pour atteindre la température de l'air de la veine. On remarque aussi que la variation de la température entre les quatre points est négligeable. Cela est légitime compte tenu des petites dimensions de l'échantillon.

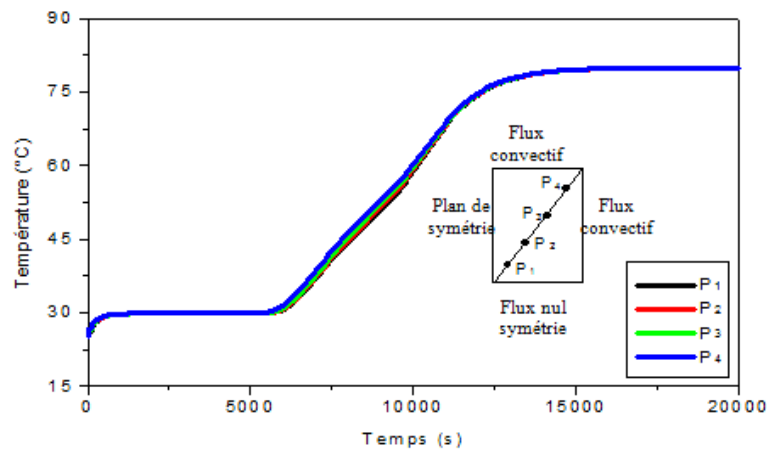


Figure 4 : Evolution de la température en quatre points de l'échantillon

2.2.2 Profils de la contrainte mécanique

L'intérêt principal d'étudier les contraintes mécaniques est de pouvoir éviter les fissurations qui peuvent se produire lors de séchage pour libérer l'énergie mécanique emmagasinée dans le produit. Les résultats des simulations prouvent que les plus grandes contraintes se produisent à la surface de l'échantillon et surtout au début de séchage (voir la figure 5).

Ainsi au début du séchage, le cœur de l'échantillon est en compression (contraintes négatives) tandis que la surface est en traction (contraintes positives) à cause du retrait. Puis, peu à peu, les contraintes de la partie sèche diminuent et deviennent négatives : c'est l'inversion des contraintes, qui exprime le caractère viscoélastique du matériau. L'évolution se poursuit : les contraintes diminuent en valeur absolue pour s'annuler à la fin du séchage avec la stabilisation de la teneur en eau et la fin du retrait.

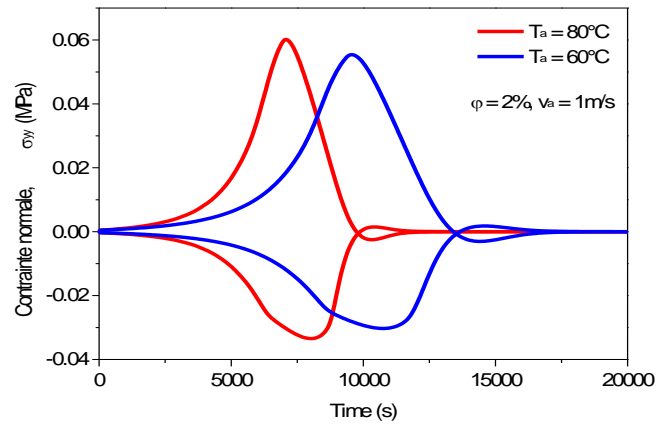


Figure 5 : Evolution de contrainte normale à la surface et au cœur de l'échantillon

La figure 5 montre que le niveau de la contrainte augmente rapidement au début du séchage, à cause de l'augmentation forte du gradient d'humidité, passe par un maximum, correspondant physiquement au début de la phase à vitesse décroissante et décroît par la suite pour atteindre une seconde valeur maximum de signe opposé et tend vers zéro lorsque l'humidité s'annule vers la fin du séchage.

D'après la figure 6, la contrainte la plus forte est située sur la face de l'échantillon exposée à l'air de séchage. Ceci est dû au fort retrait hydrique dans cette région (le matériau a besoin de se déformer rapidement afin de pouvoir remplir instantanément le même volume d'eau qui lui est enlevé). En conséquence, le risque de fissuration affecte uniquement la supérieure de l'échantillon. De plus, ces fissures, si elles existent, ne peuvent pas s'étendre vers le cœur de l'échantillon car il est en compression. Il est à noter aussi que la contrainte normale dans la direction x à la surface supérieure de l'échantillon est inférieure à celle sur la surface latérale (σ_{xx}), de sorte que les fissures sont alors ainsi plus susceptibles d'apparaître à la surface latérale de l'échantillon.

Par ailleurs, les deux figures nous donnent une idée générale sur le retrait du milieu après 7500s de séchage à travers les déplacements de la surface (le contour externe représente la taille initiale de l'échantillon).

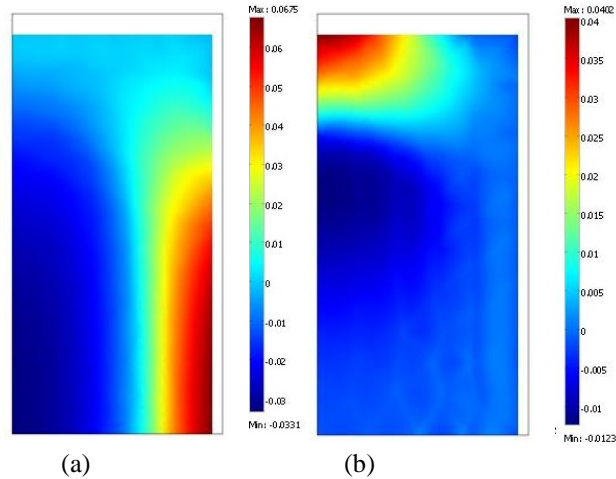


Figure 6 : Distribution de la contrainte (a- σ_{xx} , b- σ_{yy}) à $t = 7500s$ du séchage

2.2.3 Distribution de la porosité totale

La figure 7 présente l'évolution en fonction du temps de la porosité totale. Cette porosité est prise initialement égale à 0,5. Au début du séchage (après 900s), la porosité totale est pratiquement uniforme et le liquide et le gaz sont uniformément redistribués dans le produit. Après 3600s du séchage, la réduction du volume des pores est plus accentuée aux coins de l'échantillon exposé à l'air de séchage. Ces premiers résultats de simulation pourront être confirmés par des observations expérimentales de la structure interne de l'échantillon.

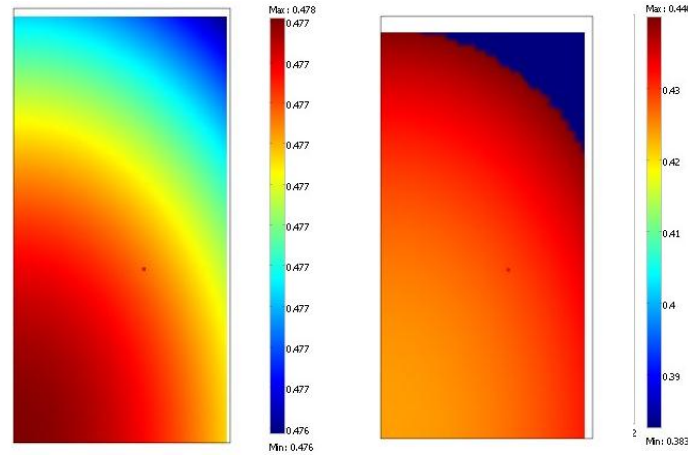


Figure 7 : Distribution de la porosité : a-après 900s et b- après 3600s du séchage

Nomenclature

a_w	Activité de l'eau [%]	ΔH_{des}	Enthalpie de désorption de l'eau [$J.kg^{-1}$]
A	Surface d'échange [m^2]	ϕ	Porosité totale (à l'état sec)[-]
c	Concentration [$kg.m^{-3}$]	ϕ_g	Fraction volumique de la phase gaz[-]
C_p	Capacité thermique massique [$J.kg^{-1} . ^\circ C^{-1}$]	ϕ_l	Fraction volumique de la phase liquide[-]
D_v^{eq}	Diffusivité hydrique équivalente en phase vapeur [$m^2.s^{-1}$]	ρ	Masse volumique du solide [$Kg.m^{-3}$]
E	Module de Young [pa]	ρ_s	Masse volumique intrinsèque [$Kg.m^{-3}$]
E_i	Module d'élasticité [pa]	ω_a^g	Fraction massique de l'air dans la phase gaz[-]
G	Module de cisaillement [pa]	ω_v^g	Fraction massique de la vapeur dans la phase gaz [-]
h	Coefficient d'échange thermique par convection [$W.m^{-2}.k^{-1}$]	ε_{ij}	Tenseur de contrainte [-]
h_i	Enthalpie massique de la composante i [$J.K^{-1}$]	ε_{ij}^m	Tenseur déformation mécanique [-]
K^{eq}	Perméabilité équivalente du produit [m^2]	ε_{ij}^h	Tenseur déformation hydrique [-]
L_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau [$J.kg^{-1}$]	σ_{ij}	Tenseur de déformation [-]
m	Masse [kg]	μ_i	Viscosité [$m^2.s^{-1}$]
\dot{m}_{vap}	Quantité d'eau évaporée par unité de volume et de temps [$kg.m^{-3}.s^{-1}$]	τ_i	temps de relaxation [s]
n	Densité de flux massique [$kg.m^{-2}.s^{-1}$]		
p	Pression [Pa]		
q_v	Densité de flux de masse [$Kg.m^{-2}.s^{-1}$]		
Q_v	Perte en eau du produit [$kg.s^{-1}$]		
R	Constante des gaz parfait [$J.mol^{-1}.K^{-1}$]		
V	Volume [m^3]		
V_a	vitesse de circulation de l'air [$m.s^{-1}$]		
X	Teneur en eau [$kg.kg^{-1}$]		
Y	Humidité absolue [%]		
(x, y)	variables d'espace [m]		

Conclusion

Pour simuler et optimiser le procédé de séchage convectif des composites argilo-cellulosiques, un modèle capillaro-poreux adopté aux milieux déformables non saturés a été proposé. Ce modèle est basé sur les gradients

des fluides comme termes moteurs de l'écoulement. Il tient compte aussi du fort couplage hydromécanique lors du séchage en utilisant les contraintes effectives qui expriment que la contrainte appliquée au milieu se répartit de manière additive entre la contrainte dans le solide et la pression dans le fluide. Ce modèle a été validé par rapport aux courbes expérimentales de la teneur en eau moyenne pour des essais de séchage à différentes conditions. Il a ensuite été utilisé pour simuler l'état hydro-thermo-mécanique d'un échantillon long et de section carrée d'un composite argilo-cellulosique en cours de séchage. Les contraintes mécaniques simulées ont été interprétées en termes d'endommagement potentiel du produit. Ce modèle peut constituer un outil d'optimisation du séchage des milieux non saturés déformables, en évitant les éventuelles fissurations qui se produisent dans tels produits en cours du procédé.

Références

- [1] Constant, T.; Moyne, C.; Perré, P. (1996) .Drying With Internal Heat Generation: Theoretical aspects and application to microwave heating. *AIChE Journal*.
- [2] Perré,P.; Turner, I.W. (1999). A 3-Dversion of TransPore: A comprehensive heat and mass transfer of computational model for simulating the drying of porous media .*International Journal of Heat and Mass transfer* .Vol, 42, pp 4501-4521.
- [3] Salagnac, P.; Glouannec, P.; Lecharpentier, D. (2004). 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*.
- [4] Whitaker, S.(1977). Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media a theory of drying .*Advances in Heat Transfer*.Vol, 13, pp.199-203.
- [5] Verbrugge,J.C.;Fleureau,J.M.2002.Bases expérimentales du comportement des sols non saturés.
- [7] Biot, M.A. (1941). General theory of three dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*. Vol, 12, pp.155-164.
- [7] RAO, V.S.; SANKHLA, N.; KHAN, A.A. (1975). Additive and synergistic effect of kinetin and ethrel on germination, thermodormancy, and polyribosome formation in lettuce seeds. *Plant Physiology*.Vol, 56, p.263-266.
- [8] Itaya, Y.; Okouchi, K.; Mori, S. (2001). Effect of heating modes on internal strain-stress formation during drying of molded ceramics. *Drying Technology*.Vol, 19 , pp. 1491-1504.
- Jomaa, W. (1991). Séchage de matériaux fortement déformables prise en compte de la vitesse de retrait. Thèse. Université de Bordeaux I.
- [9] Mercier, F. (1996). Séchage de gel d'alumine : Maitrise de la texture de supports de catalyseurs .Thèse de doctorat, Université de bordeaux I
- [10]H.Yang , N. Sakai,M. watanable .(2001). Drying Model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer. *Drying Technology*.Vol, 19, pp 441-1460.
- [11] Kowalski, S.J.; Rajweska, K. (2002). Drying-induced stresses in elastic and viscoelastic saturated materials .*Chemical Engineering Sciences*.Vol, 57, pp.3883-3892.
- [12] Azzouz, S. (1999). Eude des phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux au cours du séchage: Application aux produits agro-alimentaires. Thèse de doctorat en physique. Faculté des sciences de Tunis.
- [13] Hassini, L. (2007). Transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage convectif d'un produit agro-alimentaire déformable. Thèse de doctorat en physique.
- [14] Mihoubi D.(2004). Déshydratation d'argile par compression et séchage: Aspects de modélisation et de simulation, Thèse, ENIM, Université de Monastir, Tunisie.
- [15] Hammouda I.; Mihoubi, D. (2013). Modeling of drying induced stress of clay: Elastic and viscoelastic behaviors. *Mechanics of time –Dependent Materials*. Vol, 18 ,pp.97-111.
- [16] Hammouda ,I. ; Mihoubi, D.(2014). Thermodynamic and mechanical characterization of Kaolin clay .*Polish Journal of Chemical Technology*.Vol, 16, pp.28-35.
- [17] Lamloumi, R.; Hassini, L.; Lecomte-Nana, G.L. ; Elcafsi, M.A. ; Smith, D. (2014). Modeling of hydro-viscoelastic state of deformable and saturated product during convective drying,pp.1-15.
- [18].Chemkhi, S. (2008). Séchage d'un milieu déformable non saturé : modélisation du couplage hygromécanique .Thèse en cotutelle entre l'université Bordeaux 1 : école doctorale sciences physiques et de l'ingénieur et l'école nationale d'ingénieurs de Monastir.
- [19]Whitaker, S. (1980). Heat and mass transfer in granular porous media, *Advance in drying*.Vol, 1, pp.23-61, Hemisphere, New York.