

Modélisation du séchage par convection

L. Remache^{1*} et A. Belhamri²

¹ Département de Mécanique, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, Algérie

² Département d'Installation, Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie

Résumé – Le séchage est l'un des processus industriels qui nécessite une énergie intense. Pour la réduire, une nouvelle technique apparaît qui consiste en la réduction du temps de séchage, croître le taux de séchage et contrôler la qualité du produit. Les matériaux de construction sont des matériaux poreux. Cette particularité structurale les rend aptes à fixer l'humidité par voie de conséquence, les expose à des modifications de leurs caractéristiques physiques, notamment au point de vue mécanique et thermique. Leur séchage est délicat. Fondé sur le modèle de Whitaker et sur une procédure semi empirique pour la détermination des coefficients phénoménologiques du matériau, on a décrit les phénomènes de transfert de chaleur et de masse qui régissent le procédé de séchage. Les résultats obtenus sont les profils de saturation et de température qui jouent un rôle capital, non seulement sur la cinétique de séchage mais aussi sur la localisation du front d'évaporation au sein du matériau au cours du temps de séchage.

Abstract - Drying is the most industrial process who needs intensive energy. For its reduction a new technique is employed that consist in drying time reduction and increase the drying rate and control the product quality. Construction materials are porous ones that fixed moisture then there physical propriety changes specially mechanic ones and thermal ones. We utilize Whitaker model and empirical method for process description. Results give profiles of saturation and temperature that are very important for located evaporation front.

Mots clés: Transfert de chaleur et de masse – Modélisation – Séchage – Matériau de construction.

1. INTRODUCTION

La recherche dans le domaine des transferts de chaleur et de masse couvre un champ très vaste car les applications concernées sont extrêmement variées. On peu citer les procédés de séchage, l'isolation thermique, les écoulements géophysiques, etc. L'apparition de l'humidité dans l'enveloppe des bâtiments est généralement attribuée aux phénomènes de diffusion et de condensation de l'air humide intérieur. La méthode de Glaser (calcul stationnaire de diffusion de vapeur), facile à utiliser n'est malheureusement qu'un outil simplifié qui ne permet que d'éviter les risques de condensation dans la masse.

Il y a cependant d'autres sources d'humidité, comme la pluie battante, les remontées capillaires, l'humidité de construction qui peuvent aussi affecter l'ensemble du patrimoine bâti: monuments historiques et constructions récentes. Ces phénomènes ne peuvent pas être traités correctement avec la méthode de Glaser qui ne décrit que le processus de diffusion, car d'autres mécanismes apparaissent, comme la condensation en été, les cycles humidification séchage, le gel dégel, le stockage transitoire d'humidité et la perte de chaleur par évaporation, qui peuvent soit entraîner des dommages, soit augmenter la consommation d'énergie.

* leila.remache@yahoo.fr _ belhamri-a@yahoo.fr

Pour prévoir et suivre les mouvements d'humidités dans l'enveloppe d'un bâtiment, de nombreux outils de simulation ont été développés dans le monde. Les faiblesses de la méthode de Glaser et les avantages de la simulation hygrothermique ont été reconnus par le comité Centc 89. C'est pourquoi un nouveau groupe de travail a été constitué pour pallier l'absence de guide officiel pour les outils modernes de simulation. Puisque beaucoup de fabricants sont prêts à faire tester leurs produits plus complètement afin de fournir les données 'matériau', une utilisation plus importante des outils de simulations sera possible dans le futur.

Parallèlement, pour convaincre un plus grand nombre de praticiens d'utiliser les outils de simulation, l'interface utilisateur doit devenir plus simple d'utilisation et plus fiable. Les résultats obtenus par simulation sont une aide précieuse pour comprendre les processus hygrothermique dans les parois des bâtiments. Cependant, l'interprétation de ces résultats exige une expérience pratique importante. En effet, pour quantifier les effets de l'humidité, tels que la moisissure ou la croissance des algues, la corrosion, le gel, des modèles d'analyse des données résultant des calculs doivent être développés afin de prévoir les risques de dégradation qui peuvent en résulter.

2. LES MODELES MATHEMATIQUES [1]

2.1 Modèle de diffusion

Ce modèle est gouverné par l'équation de diffusion. Le premier qui a suggéré son utilisation est Lewis (1921). Il a écrit: 'l'humidité fraîche se diffuse de l'intérieur du solide, vers la surface pour restituer sa teneur en humidité. Les profils d'humidité seront déterminer par l'intégral de l'équation de diffusion'.

Sherwood et co-workers ont appris cette idée et ont trouvé des solutions à l'équation de diffusion aussi bonnes que les données expérimentales. Sherwood a observé tôt que le comportement des principaux paramètres du modèle; le coefficient de dispersion est compliqué et difficile de prévoir la décroissance constante de diffusion avec la concentration d'humidité.

Les techniques analytiques ont été élaborées comme celles numériques par quelques chercheurs comme Arsdel, Bimbenet *et al.*, Fusco *et al.*, Vagenas et Marinos, etc. Suivant le modèle de diffusion, le point critique est atteint quant l'humidité de surface du produit est la valeur d'équilibre ou nulle pour les solides non hygroscopiques.

2.2 Modèle à front reculé

Le modèle de diffusion est assujéti à des critiques par Hougen et co-workers: 'le terme diffusion est employé par le mouvement moléculaire de vapeur et celui de l'eau dans les solides homogènes' et 'le séchage d'un corps peut être fait par un nombre de méthodes, par capillarité, par gravité, par pression externe ou par convection et une séquence de vaporisation condensation ou des gradients de température sont présents'.

Quelques modèles ont été développés pour mieux comprendre le phénomène de capillarité. Parmi les plus intéressants est le modèle à front reculé. Il se base sur ce qu'au point critique, les forces capillaires cessent d'être capables de supporter le transport d'humidité à la surface. Comme résultat, un front d'évaporation se produit et se déplace à l'intérieur du corps par augmentation du temps de séchage.

Nissan *et al.* assument que le front devient pénétrant, c'est-à-dire le reste d'humidité est complètement immobile. Ils ont estimé pour la diffusion de vapeur en surface du corps si bien comme pour le transfert de chaleur du corps, un front d'évaporation d'une manière quasi-stationnaire.

2.3 Modèles simplifiés

Les approches fondamentales peuvent être réduites à de simples modèles par insertion des suppositions additionnelles. De cette manière, Whitaker [2] dérive de ces équations compliquées, un modèle de diffusion. Il appelle le paramètre du modèle 'le coefficient de diffusion de séchage'.

Suzuki montre que le modèle est explicitement comptabilisé pour la capillarité en considérant le gradient de la pression capillaire comme une force de transmission pour le transfert d'humidité. Ce modèle est mathématiquement équivalent au modèle de diffusion.

Sous les approches fondamentales, les modèles présentés par Berger et Pei [3], Macleroy et Kelly, Hadley et Bories, parmi d'autres prétendent et à un certain degré chercher une représentation meilleure des phénomènes physiques qui se produisent au sein des milieux poreux pendant le séchage.

Spécialement le travail conduit par Whitaker et ses étudiants, l'achève par une définition claire des équations complètes pour la conservation de masse, d'énergie et de mouvement, par un volume moyen et par la conséquence des restrictions et de suppositions et il a introduit des simplifications qui sont entretenues à part. Malgré ces avantages et suivant ma connaissance, personne n'a utilisé un modèle fondamental pour modéliser un séchoir convectif industriel pour un produit particulier. Ceci est du au deux raisons suivantes:

- *la complexité mathématique*: le problème complet proposé par Whitaker se compose par quatre équations aux dérivées partielles, une pression scalaire et cinq relations thermodynamiques couplées et fortement non linéaires.
- *Le défaut de connaissance des paramètres du modèle*: parmi les paramètres numériques voulus pour appliquer les modèles, les plus importants sont: la pression capillaire, la perméabilité du gaz et la conductivité thermique effective. Tous ceux-ci sont fonction de la saturation (i.e. de la position x), d'autres en fonction de la température. En plus, le liquide est supposé avoir atteint l'immobilité complète. Yoshida *et al.* ont développé ce concept avant par introduire une certaine transformation. Ils ont découvert une fonction caractéristique qui reste à peu près invariable pendant la seconde période de séchage et peut, ainsi, être utilisée dans le but de caractériser la cinétique microscopique.

Dans le même cadre, Chen et Schmidt profitent de l'influence de l'hygroscopicité. Pour les produits hygroscopiques, la seconde phase de séchage commence quand l'humidité de surface correspond à l'équilibre de sorption. La migration de l'humidité dans la zone 'sèche' est possible. Sur la base de ce travail, la définition claire des limites entre les différents modèles peut être bien illustrée.

Actuellement, Suzuki, Keey et d'autres auteurs ont utilisé l'équation de diffusion dans le but de décrire l'activité capillaire dans la section humide. La propriété de transport est appelée diffusivité d'humidité et est supposée dépendante de la teneur d'humidité.

Finalement quelques recherches classifient le séchage avec un front reculé comme un problème de Stephan généralisé. Ils adoptent une approche transitoire réelle et compense la complexité mathématique des résultats par d'autres suppositions (Gupta, Cross *et al.*). Une combinaison entre un modèle plan d'évaporation simple avec des analyses de couche limite pour une plaque est présentée par Morgan et Jerazunis, Przesmych et strumillo communiquent un modèle sophistiqué avec deux fronts pour les matériaux hygroscopiques.

3. MODELISATION DU PHENOMENE DE SECHAGE

Le séchage par convection, c'est un mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques [4]. La théorie classique (Bimbenet) divise le séchage d'un matériau en trois périodes:

- période 0, mise en température du produit;
- période I, séchage isenthalpique de vitesse de séchage constante ou l'eau libre s'évapore;
- période II, ralentissement, évaporation de l'eau liée, cette phase de séchage prend naissance en général lorsque la saturation des pores se trouve dans le domaine hygroscopique [5].

3.1 Raisons de l'existence de la première phase de séchage

Suivant l'opinion la plus largement connue, le produit se comporte pendant la première phase de séchage comme la surface libre du liquide parce qu'il est couvert par un film continu de liquide. Néanmoins, il est difficile d'expliquer, quel type de forces pouvait créer et préserver ce film.

D'autre part, les observations expérimentales numériques indiquent que quelques possèdent une vitesse constante presque toute la surface sèche. La contradiction a été résolue par de séries d'investigations théoriques par Suzuki et Maeda, Van Brakel, Hertjes, Suzuki et Schlunder. Ils ont montré qu'une surface complètement humide si les taches humides sont petites en comparaison avec la couche limite du gaz et uniformément distribuées.

3.2 Courbe de séchage

Des expériences effectuées en laboratoire, permettent d'obtenir des courbes dites 'cinétiques de séchage' qui interprètent les différentes phases de séchage du produit [5]. Le modèle des séchoirs convectifs pour un produit particulier peut être conduit avec l'aide de ces courbes. Dans quelques cas, une normalisation est un succès. La courbe de séchage normalisée résultante est une expression des cinétiques microscopiques.

4. MATERIAUX POREUX

Dans cette étude, on considère les matériaux de construction dont la plupart d'entre eux sont à structure poreuse ou cellulaire et plus particulièrement à porosité ouverte dans une structure consolidée [6]. Un matériau poreux (Fig. 1) comprend généralement trois phases:

- Une phase solide, liée à la structure (ou squelette) du matériau;
- Une phase liquide, c'est-à-dire l'eau contenue dans le matériau (eau libre et eau adsorbée);
- Une phase gazeuse qui est l'air humide.

Phénomènes physiques dans les matériaux poreux

Les parois de construction sont soumises généralement à des conditions de température et d'humidité relative non stationnaire (variations climatologiques et variations d'ambiances dans les pièces de l'habitat) [6]. Donc leur comportement fait intervenir les transferts de chaleur et de masse pour l'air et l'humidité [7].

La présence d'eau dans les matériaux entraîne une modification de certaines caractéristiques.

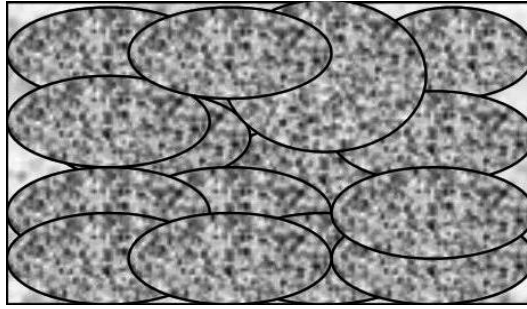


Fig. 1: Schéma d'un solide poreux

5. MODELISATION ET RESULTATS

La résolution théorique complète rigoureuse d'un problème de transfert de chaleur et de masse (séchage) dans un matériau poreux est extrêmement compliquée [8]. Les bilans de chaleur et de masse montrent un fort couplage entre les différents transferts. Ce couplage induit forcément à des méthodes de calcul coûteuses en temps dès que le modèle d'évolution de l'air et du produit dans le séchoir se complique [9].

Basée sur la technique du volume élémentaire représentatif [10], on a décrit le processus de séchage d'une plaque poreuse humide soumise à un courant d'air chaud (Fig. 2).

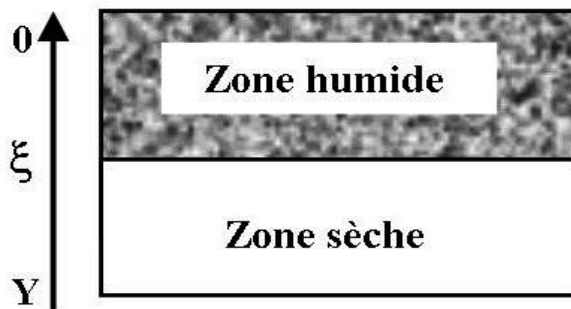


Fig. 2: Modèle mathématique

La plaque commence à s'évaporer sous le gradient de température. Le bilan des échanges de masse s'écrit comme suit:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$D(S) = \frac{k k_l}{\mu_l \varepsilon} \left(-\frac{\partial P_c}{\partial S} \right) + D_{\text{eff}} \frac{M_v}{R T \rho_l \varepsilon} P_{vs} \frac{\partial f}{\partial S} \quad (2)$$

$$f(S) = \exp \left(\frac{-P_c(S) M_v}{\rho_l R T} \right) \quad (3)$$

Conditions initiales et aux limites

A l'instant initial

$$S = S_0 \quad (4)$$

A la surface $y = e$

$$D \frac{\partial S}{\partial y} = \dot{m} \quad (5)$$

A la face symétrique $y = e/2$

$$D \frac{\partial S}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Au front d'évaporation

$$y = \xi; D_{\text{eff}} \frac{\partial \rho_v}{\partial y} = \rho_l \varepsilon D \frac{\partial S}{\partial y} + \rho_l \varepsilon \frac{\partial \xi}{\partial t} S(\xi) \quad (7)$$

$$S(\xi) = S_{\text{irr}} \quad (8)$$

$$\dot{m} = \frac{P_v(\xi) - P_{\text{air}}}{\frac{1}{h_m} + \left(1 - \frac{\xi}{D_{\text{eff}}}\right) \frac{M_v}{R T}} \quad (9)$$

On résout le système d'équations aux dérivés partielles par la méthode des volumes finis. Ces solutions sont les profils de saturation et de température.

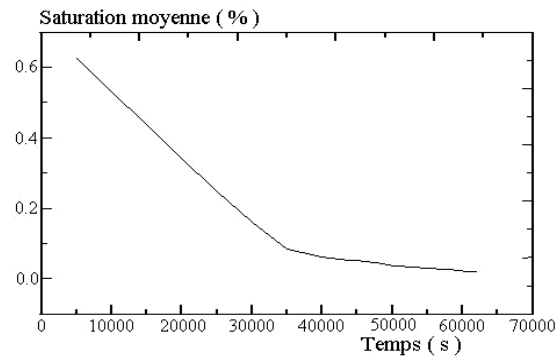


Fig. 3: Profil de saturation au cours du temps

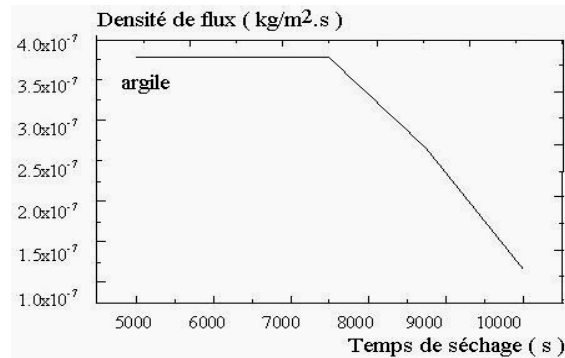


Fig. 4: Profil de densité de flux au cours du temps

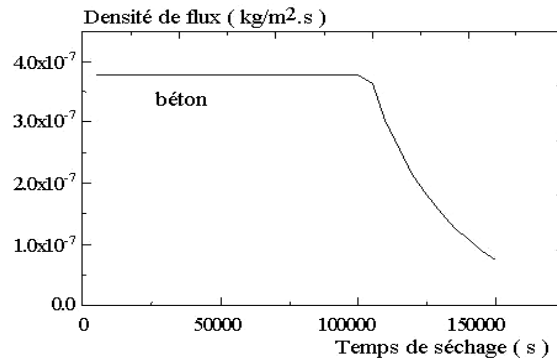


Fig. 5: Profil de densité de flux au cours du temps

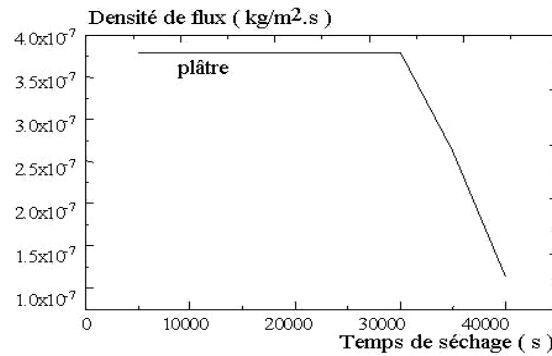


Fig. 6: Profil de densité de flux au cours du temps

Les figures 3-6 montrent que le séchage s'effectue en deux périodes. La première s'arrête quand la saturation atteint sa valeur irréductible. La forme est presque linéaire à cause du choix des conditions de séchage constantes (vitesse, température et humidité relative). La deuxième phase commence, la saturation et la densité de flux décroissent pour s'annuler.

Cette variation s'observe pour les trois types de matériaux de construction. La température (Fig. 7) croît au cours du temps et elle varie suivant le coefficient de transfert de chaleur (Fig. 8) qui est pris constant et il se calcule en fonction du coefficient de transfert de masse.

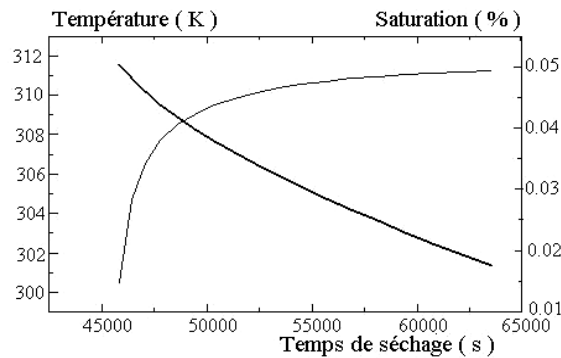


Fig. 7: Profil de température et de saturation au cours du temps

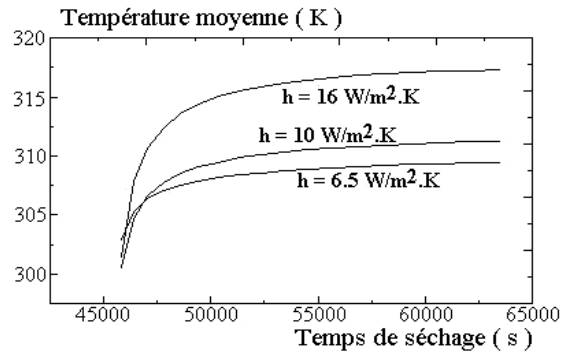


Fig. 8: Profil de température en fonction du coefficient de transfert de chaleur

6. CONCLUSION

La complexité des phénomènes de transfert de chaleur et de masse intervenant en régime transitoire pour certains types de conditions aux limites, la comparaison entre les résultats d'expérience et de simulation numérique nous a permis de montrer:

- le rôle et l'importance relative des mécanismes de transfert de masse, ainsi que de leurs composantes respectivement associées aux gradients de saturation et de température, sur la formation du front d'évaporation et son évolution.
- Le transfert de masse peut inclure deux phénomènes de base, la convection externe représentée par le coefficient de transfert de masse et la diffusion représentée par le coefficient de diffusion.
- Le transfert de chaleur est dû à la variation lente de la conductivité thermique avec l'humidité.
- La méthode implicite est robuste pour la résolution d'équations du modèle.
- Enfin le modèle de diffusion constitue un outil de description tout à fait satisfaisant des processus de diffusion et d'évaporation et de leur évolution.

NOMENCLATURE

D	: Coefficient de diffusion massique [m^2/s]
e	: Epaisseur, [m]
h_m	: Coefficient de transfert de masse, [m/s]
k	: Perméabilité, [m^2/s]
M	: Masse molaire, [kg/mole]
P	: Pression, [Pa]
D	: Constante des gaz parfaits
D	: Saturation
T	: Température, [K]
Y	: Position, [m]
Ξ	: Position du front

Indices

c : capillaire; l : liquide, v : vapeur

REFERENCES

- [1] E. Tsotsas, '*Measurement and Modelling of Intra Particle Drying Kinetics: A Review*', Drying Technology, pp. 32 – 38, 1992.
- [2] Beishi Chen and D.C.T. Pei, '*A Mathematical Model of Drying Processes*', International Journal Heat and Mass Transfer, Vol. 37, N°2, pp. 297 – 316, 1989.
- [3] A. Chareau et R. Cavaillé, '*Séchage. 1- Théorie et Calculs*', Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie et Procédés
- [4] M. Giat et M.C. Grouhell, '*Problème de Séchage en Milieux Poreux. Application à un Toit de Tuiles de Terre Cuite*', Revue Générale de Thermique, N°324, pp. 11 – 18, 1988.
- [5] A. Belhamri, '*Sur les Cinétiques de Séchage de Quelques Types de Matériaux de Construction*', Revue des Sciences et Techniques, pp. 16 – 22, 1997.
- [6] Y. Couasnet, '*Contribution à l'étude du Transfert de Vapeur d'Eau en Régime Permanent et non Stationnaire dans les Matériaux Poreux Hygroscopiques*', Cahiers du Centre Scientifique et Technique du bâtiment, pp. 22 – 33, 1989.
- [7] R. Dehaussé, '*Energétique des Bâtiments. Calcul des Enveloppes*'.
- [8] S. Bories, '*Principe Physique de l'Evaporation. Transferts de Chaleur et de Masse entre un Matériau Poreux et l'Atmosphère*', Séminaire sur l'Humidité dans le Bâtiment, pp. 121 - 131
- [9] J.P. Nadeau et J.R. Puiggali, '*Séchage des Processus Physiques aux Procédés Industriels*', Edition Lavoisier.
- [10] S. Whitaker, '*Moisture Transport Mechanisms During the Drying of Granular Porous Media*', Fourth International Drying Symposium, Vol. 1, pp. 31 – 42, 1984.