

# Etude de la phase de séchage de plaques de plâtre par convection et infrarouge

P. LE BIDEAU<sup>1</sup>, P. GLOUANNEC, J-P. PLOTEAU, D. LELIEVRE, A. LE MAGUERESSE

<sup>1</sup> Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB)  
Equipe Thermique Et Energétique, Université de Bretagne-Sud,  
Centre de recherche, BP 92 116, 56 321 Lorient Cedex  
(\* auteur correspondant : [pascal.le-bideau@univ-ubs.fr](mailto:pascal.le-bideau@univ-ubs.fr))

## Résumé

De nombreux procédés industriels nécessitent une opération de séchage bien souvent énergivore et réalisée par le biais d'apports de chaleur. Dans cette communication nous présentons des cinétiques de séchage de plaques de plâtres obtenues en convection et en combinant convection et rayonnement infrarouge. A partir d'essais expérimentaux réalisés sur un pilote du laboratoire différents enseignements sont tirés et un premier modèle macroscopique représentatif des transferts de masse et de chaleur est développé.

## Nomenclature

$c_p$  chaleur spécifique,  $J.kg^{-1}.K^{-1}$   
 $D$  coefficient de diffusion massique isotherme,  $m^2.s^{-1}$   
 $Fm$  Flux masse évaporée,  $kg.m^{-2}.s^{-1}$   
 $h$  coefficient d'échange,  $W.m^{-2}.K^{-1}$   
 $HR$  humidité relative de l'air, %  
 $L_v$  chaleur latente de vaporisation,  $J.kg^{-1}$   
 $K$  taux de changement de phase,  $kg.m^{-3}.s^{-1}$   
 $M$  masse molaire, mol  
 $P$  pression, Pa  
 $R$  constante des gaz parfaits,  $J.mol^{-1}.K^{-1}$   
 $T$  température, K  
 $W$  teneur en eau (base sèche),  $kg.kg_{bs}^{-1}$

### *Symboles grecs*

$\alpha$  diffusivité thermique,  $m^2.s^{-1}$   
 $\rho$  masse volumique apparente,  $kg.m^{-3}$

$\bar{\lambda}$  conductivité thermique,  $W.m^{-1}.K^{-1}$

### *Indices et exposants*

$0$  interface creuset-produit  
 $a$  air  
 $c$  convection  
 $L$  interface air-produit  
 $l$  liquide  
 $m$  milieu  
 $r$  rayonnement  
 $s$  solide  
 $v$  vapeur  
 $p$  paroi  
 $\infty$  hors de la couche limite thermique / hydrique

## 1. Introduction

L'amélioration de l'efficacité de ces procédés devient aujourd'hui une nécessité en terme de consommation d'énergie, de temps de production, mais aussi d'adaptabilité vis-à-vis des produits.

En effet, on assiste aujourd'hui au développement de nouveaux produits qui doivent intégrer différentes contraintes (recyclabilité, énergie grise,...) et éventuellement apporter de nouvelles fonctions (isolation,...). Une bonne approche pour atteindre cet objectif est de combiner différents modes d'apport de chaleur [1-3].

Le séchage par apports de chaleurs convectifs est couramment employé dans de nombreuses applications industrielles, comme lors de la production de matériaux destinés au secteur du bâtiment (béton, brique, plâtre...). Une approche efficace pour intensifier les échanges massiques est de combiner le séchage convectif avec des sources radiatives telles que les microondes ou le rayonnement infrarouge (court, moyen ou long). Ces technologies radiatives sont particulièrement intéressantes car elle offre la possibilité de fournir sans contact et avec une faible inertie thermique une quantité d'énergie significative. Cependant, une bonne maîtrise des moyens mis en place est nécessaire pour éviter toute détérioration du produit à transformer.

Dans le cadre de ce travail, à travers des études numériques et expérimentales, nous proposons d'étudier et de quantifier l'impact de sources rayonnantes de type infrarouge court sur les cinétiques de séchage d'un plâtre de construction.

## **2. Matériaux et techniques**

La préparation du plâtre étudié se déroule en plusieurs phases. La poudre de plâtre, le sulfate de calcium semi hydraté, le retardateur de prise et éventuellement l'amidon sont mélangés dans un malaxeur. Puis, l'eau, nécessaire à la formation du gypse est ajoutée. D'autres adjuvants peuvent être ajoutés pour notamment contrôler la porosité du produit. Le retardateur qui est introduit dans le mélange permet d'augmenter le temps de prise et ainsi facilite la mise en place de l'instrumentation. Une fois le mélange final réalisé, le plâtre est versé dans des creusets en téflon de dimensions intérieures 11cm x 11cm et de profondeur 15mm.

La formulation retenue permet d'obtenir un produit frais dont la teneur en eau initiale est comprise entre 0,5 et 0,58  $\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{BS}}^{-1}$ . Dans ces conditions, la porosité du matériau qui dépend fortement du taux de gâchage (rapport entre la quantité d'eau et de poudre de plâtre) a été estimée dans une gamme comprise entre 0,6 et 0,64. Cette estimation est basée sur la connaissance de la masse volumique apparente sèche du produit fini et de la masse volumique intrinsèque du sulfate de calcium semi hydraté.

### **2.1. Descriptif du banc de séchage**

Afin d'accéder au comportement thermo-hydrigue du produit, des cinétiques de séchage ont été mesurées sur un pilote du laboratoire que nous présentons brièvement [4]. Le flux d'air est appliqué tangentiellement à la surface supérieure de l'échantillon (figure 1). En raison des vitesses d'air utilisées, la température de l'air et l'humidité relative peuvent être considérées comme constantes sur la surface supérieure de l'échantillon. La température et la vitesse d'écoulement d'air sont commandées et régulées. L'humidité relative de l'air présent dans l'enceinte est mesurée mais non régulée.

La source de rayonnement infrarouge est située à une distance de 20 cm de la surface du produit. Cette source est constituée d'une cassette équipée de trois lampes infrarouges de courtes longueurs d'ondes. La puissance de l'émetteur infrarouge est régulée via un bloc de thyristors fonctionnant en angle de phase.

Dans cette configuration, la surface du produit est soumise à un éclairage infrarouge. L'homogénéité de l'éclairage reçu a été contrôlée via des mesures à l'aide de fluxmètres [5].

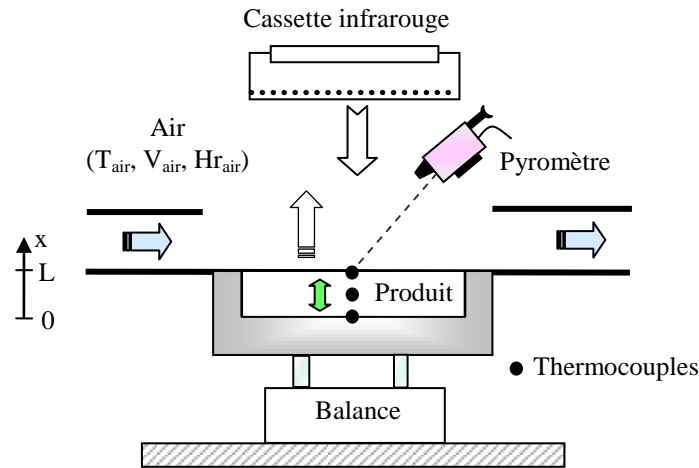


Figure 1 : Dispositif expérimental

## 2.2. Instrumentation

Les températures d'air sont mesurées en entrée et en sortie de l'enceinte par des thermocouples (type K). La vitesse de l'air à la surface du matériau et l'humidité relative de l'air ambiant sont respectivement mesurées par un anémomètre omnidirectionnel et un hygromètre. Le creuset contenant le produit est placé sur une balance électronique qui réalise l'acquisition continue de la masse du produit. La précision sur la mesure de masse est estimée à 0,1 g. A partir de cette mesure de masse, la teneur en eau moyenne (base sèche) du produit est calculée.

Lors des essais de séchage, en convection ou en convection et infrarouge court, les températures du matériau sont mesurées par des thermocouples (type K) de 0,5 mm de diamètre. Ces capteurs sont positionnés dans le sens des isothermes à proximité de la surface, au cœur du produit et à sa base. Un pyromètre à visée optique mesure la température de surface.

## 3. Modèle thermo-hydrique

Cette partie concerne la mise en équations des phénomènes de transfert de chaleur et de masse présents dans les matériaux capillaro-poreux hygroscopiques tels que le plâtre [6-8].

Le modèle développé s'appuie sur l'approche macroscopique proposée par Whitaker [7]. Le milieu étudié est considéré comme homogène et est constitué de trois phases : solide, liquide et gazeuse. Les variables du modèle sont la température et la teneur en eau massique. Les transferts de masse et de chaleur sont supposés unidimensionnels. La gravité est négligée et aucune réaction chimique et aucun retrait ne sont considérés.

### 3.1. Equation de conservation de masse

Les équations de conservation de masse sont écrites pour chaque fluide existant dans le milieu poreux en prenant en compte les hypothèses suivantes : la phase gazeuse est un mélange parfait de deux constituants, l'air sec et la vapeur d'eau et, la phase liquide contient l'eau libre et l'eau physiquement liée. A partir de ces équations différentielles et en considérant la loi de Darcy généralisée et la loi de Fick, on peut écrire l'équation globale de la conservation de la masse [8].

Dans ce modèle, le terme de thermo-migration est supposé négligeable. On obtient donc :

$$\frac{\partial W}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ (D_l + D_v) \nabla W \right] = 0 \quad (1)$$

### 3.2. Equation de conservation de l'énergie

Sous l'hypothèse de l'existence d'un équilibre thermodynamique local entre les différentes phases du milieu poreux, la conservation de l'énergie est décrite par une équation globale, combinant la loi de Fourier qui représente le transfert de chaleur par conduction à laquelle sont associés les termes relatifs à la convection et au changement de phase. En négligeant le terme relatif au transfert convectif, l'équation de la chaleur peut être mise sous la forme suivante :

$$\overline{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\overline{\lambda} \nabla T) - K L_v = 0 \quad (3)$$

Où  $K$  le taux de changement de phase est donné par l'équation :

$$K = \rho_s \nabla \cdot (D_v \nabla W) = \nabla \cdot \dot{m}_v \quad (4)$$

### 3.3. Conditions aux limites

Les conditions à l'interface air-produit (en  $x=L$ ) sont de type convectif et radiatif.

Pour l'équation (3), la conservation des flux de chaleur permet d'écrire :

$$-\overline{\lambda} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_L - \rho_l \overline{V}_l L_v = h_c (T_a - T(L,t)) + h_r (T_p - T(L,t)) \quad (5)$$

Dans le cas d'un séchage combinant échanges convectifs et sources infrarouges courts, un terme de densité de flux imposé (éclairage infrarouge absorbé) est ajouté à l'équation (5).

La conservation du flux de masse est donnée par l'équation suivante :

$$-(D_l + D_v) \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{k_m}{\rho_s} \frac{M_v}{R} \left( \frac{P_{vL}}{T_L} - \frac{P_{v\infty}}{T_a} \right) \quad (6)$$

A l'interface creuset produit (en  $x=0$ ) la surface est supposée imperméable et à température fixée :

$$(D_l + D_v) \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_0 = 0 \text{ et } T(0,t) = T_0 \text{ mesurée} \quad (7)$$

Cet ensemble d'équations est résolu numériquement en exploitant la méthode des différences finies et un schéma temporel de type implicite.

Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, chaleur spécifique...), les isothermes de désorption et la porosité nécessaires à des simulations ont été mesurées. La forme des expressions des coefficients de diffusions massiques isothermes retenus sont issus des travaux de Zaknune et al [9]. Une estimation des paramètres de ces expressions a été réalisée par la minimisation de la somme de deux critères quadratiques sur la masse et la température de surface.

## 4. Résultats et discussions

### 4.1. Séchage convectif

Le premier résultat concerne un essai convectif. Les températures du plâtre (en surface  $T_L$  et à la base  $T_0$ ) ont été suivies immédiatement après la fabrication de l'éprouvette qui était placé dans une ambiance aux environs de  $25^\circ\text{C}$  (figure 2a). On observe alors une réaction exothermique induite par l'hydratation du produit qui se traduit par une augmentation très sensible et rapide de la température du produit. En effet, durant cette phase, le sulfate de calcium semi hydraté ( $\text{CaSO}_4, 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) qui constitue la poudre de plâtre se transforme en sulfate de calcium dihydraté ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) communément appelé gypse. Durant cette phase d'hydratation qui dure environ 1 h 30, un film est placé sur la surface du produit pour limiter toute perte de masse due à l'évaporation de l'eau (figure 2b). L'étude de la phase de séchage débute lorsque cette phase d'hydratation est achevée ; soit après 6000 s. La face supérieure de l'éprouvette est alors soumise à une température d'air de  $80^\circ\text{C}$  et une vitesse de  $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Au début du séchage, l'air circulant dans la veine d'essai est chauffé rapidement jusqu'à une température de  $80^\circ\text{C}$ . Cette température est maintenue durant toute la durée de séchage et l'humidité relative de l'air est stable et égale à 2,5 %. Dans ces conditions, la température de la surface du produit augmente rapidement jusqu'à  $35^\circ\text{C}$  (figure 2a) et se stabilise durant la phase de séchage à vitesse constante (figure 2b). Cette phase qui dure environ 45 min correspond à la période où l'activité de la surface du produit est proche de 1. Dès lors que l'activité de l'eau en surface chute, c'est-à-dire pour des teneurs en eau locales inférieures à  $0,01 \text{ kg}_{\text{eau}}\cdot\text{kg}_{\text{BS}}^{-1}$ , on constate une diminution du flux masse d'eau évaporée entraînant une augmentation globale des températures au sein du produit. Durant cette période, le flux masse d'eau évaporée diminue continuellement (figure 2b). On peut également noter, à partir des relevés de températures effectués au fond de l'échantillon (figure 2a), qu'une importante augmentation de température est visible après 3,5 h de séchage. Cette augmentation est due à la chute de la teneur en eau au fond de l'échantillon. Dès lors, la quantité d'eau évaporée devient proche de 0 marquant la fin de la phase de séchage. Durant l'ensemble du séchage on observe que le gradient de température reste faible au sein de l'éprouvette (inférieurs à  $11^\circ\text{C}$  dans l'épaisseur de l'éprouvette).

Le modèle permet également d'accéder aux évolutions de teneurs en eau locales. Sur les figures 2a et 2b sont reportées des évolutions calculées par le modèle. On observe que la température en surface simulée suit correctement l'expérience. La figure 2b montre également un bon accord entre la teneur en eau moyenne mesurée et calculée. Par ailleurs, le tracé des teneurs en eau locale, en surface et au fond du produit, nous informe des gradients présents durant le séchage et permet de visualiser le passage au dessous de  $0,01 \text{ kg}_{\text{eau}}\cdot\text{kg}_{\text{BS}}^{-1}$ .

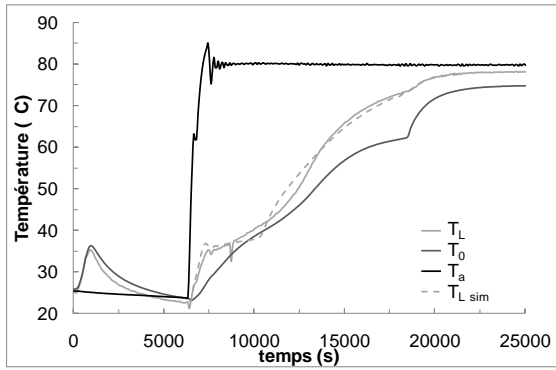


Figure 2a : Séchage convectif  $80^{\circ}\text{C} / 3 \text{ m.s}^{-1}$  : Réponses en températures (mesures – traits pleins ; simulations – traits discontinus)

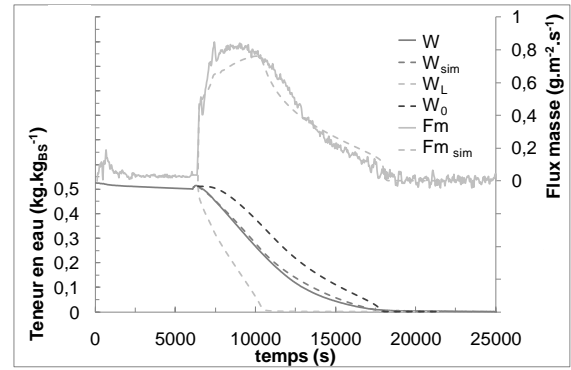


Figure 2b : Séchage convectif  $80^{\circ}\text{C} / 3 \text{ m.s}^{-1}$  : Cinétiques de séchage (mesures – traits pleins ; simulations – traits discontinus)

Le deuxième résultat concerne un essai réalisé avec une température d'air de  $40^{\circ}\text{C}$  et une vitesse de  $3 \text{ m.s}^{-1}$ . De la même manière que pour l'essai précédent, les chutes d'activité au sein du produit sont visibles sur les relevés de températures (figure 3a). Pour cet essai, on constate globalement un bon accord entre les résultats issus de la simulation et de l'expérimentation. Les simulations sont réalisées en considérant les mêmes propriétés thermiques et hydriques que précédemment. On note une différence entre la température simulée en surface et l'expérience. Cet écart est lié à l'incertitude sur la mesure par pyromètre dans des conditions proches de l'ambiance (le pyromètre est refroidi par de l'air comprimé à environ  $20^{\circ}\text{C}$ ).

Dans cette configuration, le flux masse évaporée maximal est 2,5 fois plus faible que dans l'essai précédent (figures 2b et 3b). Le temps de séchage est quant à lui 2 fois plus important. Les teneurs en eau locales simulées montrent que les gradients hydriques sont moins conséquents que ceux obtenus précédemment. Le séchage est plus homogène mais nécessite une durée de process plus importante.

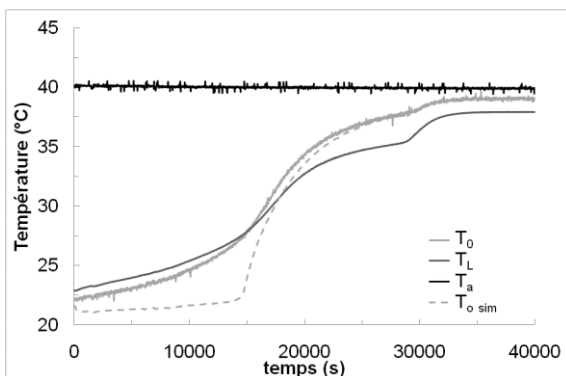


Figure 3a : Séchage convectif  $40^{\circ}\text{C} / 3 \text{ m.s}^{-1}$  : Réponses en températures (mesures – traits pleins ; simulations – traits discontinus)

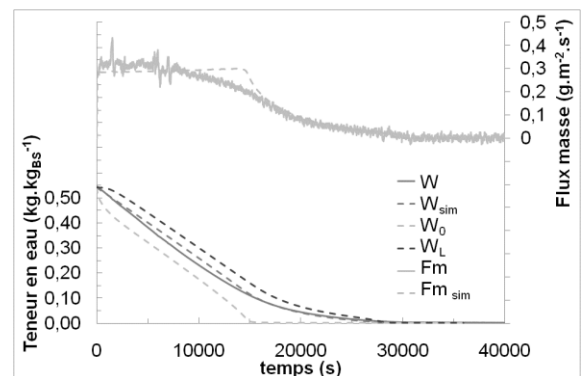


Figure 3b : Séchage convectif  $40^{\circ}\text{C} / 3 \text{ m.s}^{-1}$  : Cinétiques de séchage (mesures – traits pleins ; simulations – traits discontinus)

Des essais complémentaires ont été réalisés pour quantifier l'impact des conditions aérodynamiques sur les cinétiques de séchages. Le tableau 1 liste les essais menés en convection et compare les temps de séchages ainsi que les valeurs maximales de flux masse d'eau évaporée atteintes.

$T_a$ (°C)	$V_a$ (m.s <sup>-1</sup> )	Temps de séchage (h)	$F_m$ max (g.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )
40	1	≈ 14	0,2
40	3	> 8	0,3
80	1	> 5	0,43
80	3	> 3	0,8

Tableau 1 : *Impact des conditions aérauliques sur les cinétiques de séchage*

## 4.2. Séchage convectif et radiatif

Ce résultat concerne un essai réalisé sous apport radiatif de type infrarouge court avec une température et une vitesse d'air de 40°C de 3m.s<sup>-1</sup>. L'éclairement infrarouge incident est régulé entre deux niveaux (5300 et 6800 W.m<sup>-2</sup>) afin de maintenir le produit à une température inférieure à 80°C (figure 4a). Cette régulation a pour but d'éviter toute détérioration du produit sous l'effet de trop hauts niveaux de température (évacuation de l'eau chimiquement liée).

De part la sollicitation infrarouge, la température de surface augmente plus rapidement en comparaison de l'essai précédent mené sans apports radiatifs. Durant la phase de séchage à vitesse constante (activité de surface proche de 1), le flux masse d'eau évaporée atteint en moyenne 1,1 g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> (figure 4b). Le temps de séchage est réduit à 2,5 h.

Les évolutions de températures et de teneur en eau moyenne simulées par le modèle sont représentées sur les figures 4a et 4b. Une bonne adéquation avec l'expérimentation est constatée.

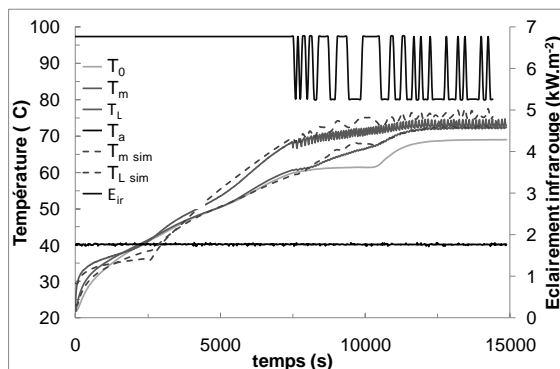


Figure 4a : *Séchage convectif / radiatif 40°C / 3 m.s<sup>-1</sup> : Réponses en températures (mesures – traits pleins ; simulations – traits discontinus)*

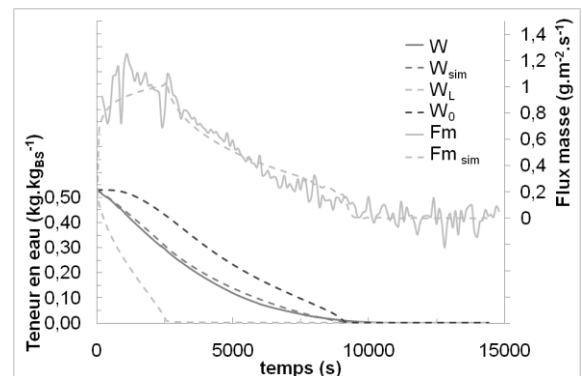


Figure 4b : *Séchage convectif / radiatif 40°C / 3 m.s<sup>-1</sup> : Cinétiques de séchage (mesures – traits pleins ; simulations – traits discontinus)*

## 5. Conclusion

Nous avons montré à travers cette étude, l'intérêt d'utiliser des sources radiatives de type infrarouge lors d'opérations de séchages de matériaux de construction. L'utilisation de telles sources permet d'initier une rapide montée en température du produit tout en maintenant son environnement à des températures modérées. Ces conditions favorisent un flux masse d'eau évaporée important et limitent ainsi les durées des opérations de séchage.

Les cinétiques de séchage ont été correctement prédites par le modèle développé. On note que les teneurs en eau expérimentales et simulées sont parfaitement superposées. Ces études préliminaires serviront de base de travail pour une étude plus complète portant sur des plaques de plâtre revêtues d'une couche superficielle (carton).

## References

- [1] P. Salagnac, P. Glouannec, D. Lecharpentier, Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying, *J. Heat Mass Transfer.*, 47 (2004), 4479-4489.
- [2] Z. Y. Li , R. F. Wang, T. Kudra, Uniformity Issue in Microwave Drying, *Drying Technology*, 29 (2011), 652-660.
- [3] S.J. Kowalski , G. Musielak , J. Banaszak , Heat and mass transfer during microwave-convective drying, *AIChE Journal*, 56 (2010), 24-35.
- [4] P. Glouannec, D. Lecharpentier, H. Noel, Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material, *Applied Thermal Engineering*, 22, (2002), 1689-1703.
- [5] P. Le Bideau, J.P. Ploteau, P. Glouannec, Heat flux estimation in an infrared experimental furnace using an inverse method, *Applied Thermal Engineering*, 27 (2009), 2463–2472.
- [6] AV. Luikov, Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary porous bodies. Pergamon Press, Oxford (1975).
- [7] S. Whitaker, Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying, *Adv. Heat Transfer*, 13 (1977), 119-203.
- [8] S. Bories, A Mojtabi, M. Prat, M. Quintard, Transferts de chaleur dans les milieu poreux – changement de phase, *Techniques de l'ingénieur*, be8251 (2008).
- [9] A. Zaknourne, P. Glouannec, P. Salagnac, Estimation of moisture transport coefficients in porous materials using experimental drying kinetics, *Heat and Mass Transfer*, 48 (2012), 205-215.