
Analyse des mécanismes de transfert de fluides lors d'essais de séchage convectif sur un limon

Pierre Gerard^{*}, ^{} — Angélique Léonard^{***} — Robert Charlier^{*}**
Frédéric Collin^{*}

^{*} *Département ArGENCo, Université de Liège, 1 Chemin des Chevreuils, 5000 Liège, Belgium,
pgerard@ulg.ac.be*

^{**} *FRS-FNRS – Fonds National de la Recherche Scientifique, Bruxelles, Belgium*

^{***} *Département de Chimie Appliquée, Université de Liège, Belgium*

RÉSUMÉ : Des essais de séchage convectif ont été réalisés sur des échantillons de limon en vue de quantifier la cinétique de perte de masse. Ces essais ont été analysés sous l'hypothèse de l'existence d'une couche limite en paroi de l'échantillon, dans laquelle des transferts de masse et de chaleur ont lieu. L'article met en avant l'intérêt de modélisations thermo-hydrauliques pour comprendre les transferts de fluides au sein de l'échantillon. Une analyse précise des résultats numériques permet de déterminer si les transferts internes sont constitués principalement d'advection d'eau liquide jusqu'à la paroi suivie par de l'évaporation, ou plutôt de l'avancée d'un front d'évaporation au sein de l'échantillon suivi par de la diffusion de la vapeur jusqu'à la paroi.

ABSTRACT. Convective drying tests were performed on silt samples in order to quantify the drying kinetics. The tests have been analyzed on the assumption of a boundary layer around the sample where the fluid and heat exchanges take place. The paper emphasizes the need of thermo-hydraulic modelling in order to understand the fluid transfers within the samples. An analysis of the numerical results highlights whether the internal transfers are mainly advective flows of liquid water to the wall, followed by vaporization, or the development of a receding front inside the sample followed by the diffusion of vapour towards the boundary.

MOTS-CLÉS : séchage convectif, modélisation, échanges de vapeur, non saturé, condition limite,

KEYWORDS: convective drying, modelling, vapour exchanges, partially saturated, boundary condition.

1. Introduction

La modélisation du séchage des géomatériaux est un enjeu important en génie civil. Les géomatériaux sont en effet soumis à des gradients de température et d'humidité relative. Dans les matériaux cimentaires, la question de la durabilité des structures du génie civil doit être étudiée sur de longues périodes de temps durant lesquelles les principales causes de modifications de la teneur en eau sont les interactions avec l'atmosphère (Baroghel-Mainguy *et al.*, 2001). Dans les sols, la ventilation des galeries envisagées pour le stockage de déchets radioactifs modifie les conditions de saturation autour de la paroi et donc le comportement des ouvrages (Gerard *et al.*, 2008). Les problèmes de stabilité de pentes sont également souvent influencés par les interactions avec l'air ambiant. Ces différents exemples d'interactions sol-atmosphère mettent en évidence le besoin de disposer d'une condition limite hydraulique capable de reproduire avec précision ces échanges, de manière à pouvoir en déduire des distributions de teneur en eau dans les géomatériaux en interaction avec l'air ambiant. Tous ces problèmes sont équivalents à celui du séchage d'un matériau poreux, qui peut être étudié au travers d'essais de séchage convectif où les conditions d'humidité relative, de température et de vitesse de l'air sont contrôlées.

Dans cet article, des essais de séchage convectif réalisés sur le limon d'Awans sont présentés (Gerard *et al.*, 2011). Ils sont analysés sous l'hypothèse de l'existence d'une couche limite au sein de laquelle les transferts de vapeur et de chaleur avec l'air ambiant se déroulent (Key, 1972 ; Coumans, 2000 ; Kowalski, 2003). Une condition limite non classique est alors proposée de manière à modéliser les essais de séchage. Des modélisations thermo-hydrauliques sont réalisées et permettent de reproduire la cinétique de désaturation. Une analyse précise des résultats numériques permet alors de distinguer les modes de transferts de fluides au sein du matériau poreux. En particulier, l'analyse montre que deux expressions différentes de la condition limite hydraulique permettent de reproduire la cinétique de séchage, mais conduisent en réalité à des modes de transferts internes différents.

2. Essais de séchage convectif sur un limon

2.1. Cinétique des processus de séchage

Les interactions entre un géomatériaux et l'air ambiant sont caractérisées expérimentalement lors d'essais en laboratoire où les conditions atmosphériques sont reproduites. Dans un dispositif de séchage convectif, l'humidité relative, la température et la vitesse de l'air sont imposées grâce à la convection d'un air humide autour du matériau (Kowalski, 2003). Il est proposé dans cet article d'analyser la cinétique de désaturation non pas sur base de l'évolution temporelle de

la masse de l'échantillon, mais bien à partir d'une courbe de séchage qui fournit le flux de séchage en fonction de la teneur en eau w de l'échantillon (Figure 1). Une telle courbe est intéressante, car elle met clairement en évidence 3 étapes dans la cinétique de désaturation (Key, 1972 ; Kowalski, 2003). Analysée en parallèle à l'évolution de la température en paroi de l'échantillon, on constate tout d'abord une période de préchauffage très courte, durant laquelle le flux de séchage augmente et la température en paroi de l'échantillon atteint la température humide T_h . Ensuite vient une période à flux constant durant laquelle la chaleur fournie par l'environnement est entièrement consommée pour vaporiser l'eau liquide, si bien que la température en paroi reste égale à la température humide. Une fois que le matériau se désature, les transferts d'eau du cœur de l'échantillon jusqu'à la surface diminuent et ne sont plus suffisants pour maintenir le flux de séchage. Une période à flux décroissant démarre alors. La température de l'échantillon augmente, puis se stabilise à la température de l'air ambiant T_a .

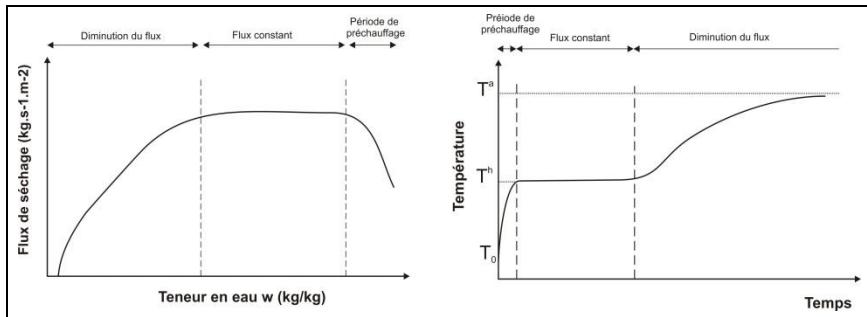


Figure 1. Courbe de séchage et évolution temporelle de la température en surface

Ces courbes de séchage sont analysées avec l'hypothèse de l'existence d'une couche limite en paroi d'échantillon, qui contrôle les échanges de vapeur et de chaleur entre l'échantillon et l'atmosphère (Kowalski, 2003). Durant la période à flux constant, on suppose que cette couche limite est saturée. Les transferts de vapeur d'eau et de chaleur sont alors uniquement influencés par les conditions externes : la température, l'humidité relative, la vitesse de l'air (Nadeau & Puiggali, 1995). On exprime le flux de vapeur \bar{q} entre le matériau et l'environnement comme le produit entre un coefficient de transfert de masse α et la différence de masse volumique de la vapeur d'eau entre la roche $\rho_{v,roche}^\Gamma$ et l'atmosphère $\rho_{v,air}$:

$$\bar{q} = \alpha (\rho_{v,roche}^\Gamma - \rho_{v,air}) \quad [1]$$

De la même manière, on exprime que l'évaporation en surface dépend des conditions thermiques. Le flux de chaleur \bar{t} de la frontière vers l'extérieur est exprimé par :

$$\bar{t} = L\bar{q} - \beta (T_{air} - T_{roche}^\Gamma) \quad [2]$$

avec T_{air} et T_{roche}^{Γ} la température respectivement de l'air ambiant et en paroi, β un coefficient de transfert de chaleur et L la chaleur latente de vaporisation ($= 2500$ kJ/kg). Le premier terme correspond à l'énergie consommée pour la vaporisation de l'eau en paroi, tandis que le second terme correspond au flux de chaleur convectif entre l'atmosphère et le milieu poreux.

2.2. Campagne expérimentale

Des essais de séchage convectif ont ainsi été réalisés à différentes températures ou humidités relatives sur le limon d'Awans. Ce matériau est un limon sableux de Belgique (Masekanya, 2008 ; Gerard, 2011). Les échantillons cylindriques initialement saturés présentent une hauteur de 14 mm, un diamètre de 17 mm et une masse d'environ 6.5 g. Une présentation détaillée et une analyse complète des résultats expérimentaux ont été réalisées par Gerard *et al.* (2010) et Gerard (2011) et ne sera donc pas détaillée dans cet article, dont l'objectif principal est la modélisation thermo-hydraulique de ces essais. Dès lors, seule une série d'essais réalisés à différentes humidités relatives h_r , à une température de 50°C et à une vitesse de l'air de 1 m/s est présentée à la Figure 2. Sur base des équations [1] et [2], les coefficients de transfert de masse et de chaleur peuvent être déduits des données expérimentales durant la période à flux constant si l'on suppose que la couche limite est saturée et que la température en paroi est égale à la température humide (voir Gerard *et al.*, 2010 pour plus de détails).

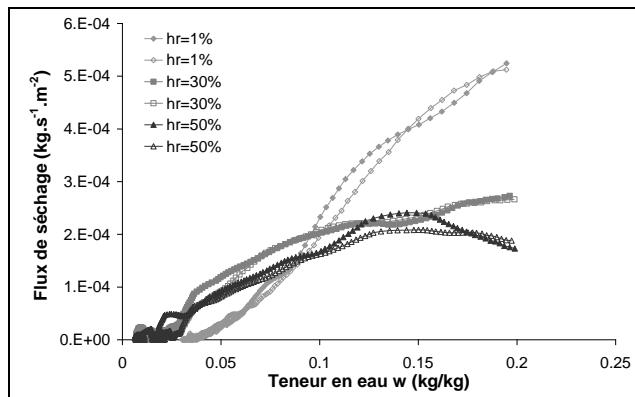


Figure 2. Courbes de séchage obtenues sur des échantillons de limon d'Awans initialement saturés pour différentes humidités relatives ($T_{air} = 50^{\circ}\text{C}$ – $v = 1 \text{ m/s}$)

3. Validation d'une condition limite hydraulique

L'objectif de cette section est de valider par des modélisations éléments finis l'expression d'une condition limite hydraulique permettant de reproduire les résultats des essais de séchage.

3.1. Condition limite hydraulique

Pour reproduire numériquement les flux de vapeur et de chaleur entre l'air ambiant et le matériau, il est nécessaire d'utiliser des éléments finis quadratiques 2D classiques associés à un élément fini frontière particulier au travers duquel les échanges ont lieu (Gerard *et al.*, 2008). Cet élément fini frontière permettant d'imposer la condition limite thermo-hydraulique comporte 4 nœuds (Figure 3). Les trois premiers nœuds sont situés sur la frontière (N1, N2 et N3). Ils permettent une discrétisation spatiale de la pression d'eau et de la température le long de la frontière. Le quatrième nœud (N4) permet de définir l'humidité relative et la température de l'environnement. Sa position géométrique n'influence pas les résultats. Deux points de Gauss sont considérés sur l'élément fini frontière. Les échanges de vapeur et de chaleur sont calculés grâce aux équations [1] et [2], où la masse volumique de la vapeur et la température de l'air ambiant sont obtenus au nœud environnement (N4) tandis que la masse volumique de vapeur et la température à la paroi du matériau sont évaluées aux points de Gauss. Plus de détails sur la formulation de l'élément fini frontière peuvent être obtenus auprès de Gerard *et al.* (2008).

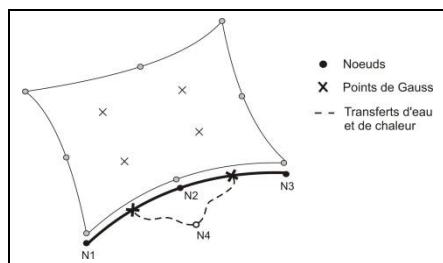


Figure 3. *Elément fini quadratique 2D et élément fini frontière*

3.2. Modèle thermo-hydraulique en saturation partielle

Au sein du matériau poreux, les flux d'eau et de vapeur d'eau sont définis par la somme de l'advection de l'eau liquide (loi de Darcy en conditions partiellement saturées) et de la diffusion de la vapeur (loi de Fick). Les courbes de rétention et de perméabilité relative à l'eau sont données par les relations de van Genuchten :

$$S_{r,w} = \left(1 + \left(\frac{p_c}{P_r} \right)^n \right)^{\frac{1}{n}-1} \quad k_{r,w} = \sqrt{S_{r,w}} \left[1 - \left(1 - S_{r,w}^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad [4]$$

avec p_c la pression capillaire, P_r la pression d'entrée d'air et n et m des paramètres de van Genuchten avec a priori $m = 1 - 1/n$.

Le modèle thermique prend en compte des échanges de chaleur liés à la conduction, à la convection, ainsi que l'énergie consommée pour la vaporisation. La formulation complète du modèle thermo-hydraulique est détaillée dans Gerard *et al.* (2010).

3.3. Définition du problème et paramètres du modèle

Une modélisation axisymétrique 2D des essais de séchage réalisés sur des échantillons cylindriques de limon d'Awans est réalisée. Vu le faible retrait des limons, on considère que les déformations sont négligeables et le matériau est supposé parfaitement rigide. La pression de gaz est supposée constante et égale à la pression atmosphérique. L'échantillon de limon d'Awans est initialement saturé. La pression d'eau initiale dans le matériau est égale à la pression atmosphérique, tandis que la température initiale est égale à la température ambiante ($= 17^\circ\text{C}$). Les échanges de vapeur d'eau et de chaleur sont imposés sur toute la surface de l'échantillon via la condition limite thermo-hydraulique développée. L'humidité relative et la température de l'air ambiant sont imposées au noeud environnement.

Les paramètres thermo-hydrauliques du limon d'Awans sont donnés au Tableau 1. Les paramètres de la courbe de rétention permettent de reproduire les données expérimentales disponibles sur la courbe de rétention (Gerard, 2011), tandis que la courbe de perméabilité relative est déduite de la courbe de rétention de Van Genuchten.

Perméabilité à l'eau	κ	$5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$	Conductivité thermique du milieu	λ	$1.3 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$
Param de Van Genuchten	n	1.35	Coef. volumique de dilatation therm. des grains	α_s	10^{-5} K^{-1}
Param de Van Genuchten	P_r	0.05 MPa	Chaleur spécifique des grains	$c_{p,s}$	$879 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Porosité	ϕ	0.35			
Tortuosité	τ	0.10			

Tableau 1. Paramètres thermo-hydrauliques du limon d'Awans (Gerard, 2011)

3.4. Résultats numériques

La modélisation d'un essai de séchage d'un échantillon de limon d'Awans avec un air présentant une humidité relative de 30% et une température de 50°C est

réalisée. Dans un premier temps, le coefficient de transfert de masse est supposé constant. Les valeurs utilisées pour les coefficients de transfert de masse et de chaleur sont celles déduites des données expérimentales de la période à flux constant. La courbe de séchage obtenue numériquement en appliquant la condition limite thermo-hydraulique en paroi d'échantillon et en imposant l'humidité relative et la température de l'air au nœud environnement est présentée à la Figure 4. La période à flux constant obtenue numériquement est plus prononcée que celle observée expérimentalement.

Afin de réduire la surestimation de la vitesse de séchage durant la phase à flux constant, il est nécessaire que les transferts internes deviennent plus rapidement le facteur limitant les échanges de vapeur avec l'extérieur. Il est pour cela envisageable de modifier la courbe de perméabilité relative à l'eau pour laquelle nous ne disposons pas de données expérimentales, de manière à mieux reproduire la cinétique de séchage. En modifiant le paramètre m de la courbe de perméabilité relative (équation [4]), il est possible d'améliorer les résultats numériques (Figure 5 (b)). Il est pour cela nécessaire de supposer une perméabilité relative qui diminue plus rapidement avec le degré de saturation, si bien que les flux d'eau liquide du cœur de l'échantillon vers la paroi ne sont plus suffisants par rapport à la capacité d'échanges de vapeur de la couche limite. La vitesse de séchage diminue donc plus rapidement.

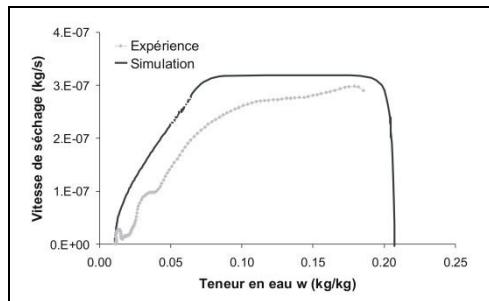


Figure 4. Courbe de séchage d'un essai sur limon avec $h_r = 30\%$ - $T_{air} = 50^\circ C$ - $v = 1m/s$ - Comparaison entre résultat expérimental et numérique

Une autre approche est envisagée pour réduire la surestimation de la vitesse de séchage. Elle consiste à supposer que l'expression de la condition limite hydraulique n'est pas adéquate. Si nous supposons que la couche limite se désature lors du séchage du matériau, il est raisonnable d'imaginer que le coefficient de transfert de masse contrôlant les échanges de vapeur est modifié. Une dépendance linéaire du coefficient de transfert avec le degré de saturation est ainsi proposée afin de reproduire une diminution de la capacité d'échange de vapeur au sein de la couche limite:

$$\bar{q} = \alpha \left(S_{r,w}^{\Gamma} \right) \left(\rho_{v,roche}^{\Gamma} - \rho_{v,air} \right) = \alpha_0 S_{r,w}^{\Gamma} \left(\rho_{v,roche}^{\Gamma} - \rho_{v,air} \right) \quad [5]$$

avec $S_{r,w}^{\Gamma}$ le degré de saturation en paroi d'échantillon et α_0 le coefficient de transfert de masse lorsque la paroi de l'échantillon est saturée.

Avec cette nouvelle expression de la condition limite hydraulique, une bonne comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques est obtenue (Figure 5 (a)). Notons cependant qu'avec cette approche, c'est la capacité d'échange de la couche limite qui restreint les transferts entre le limon et l'air ambiant.

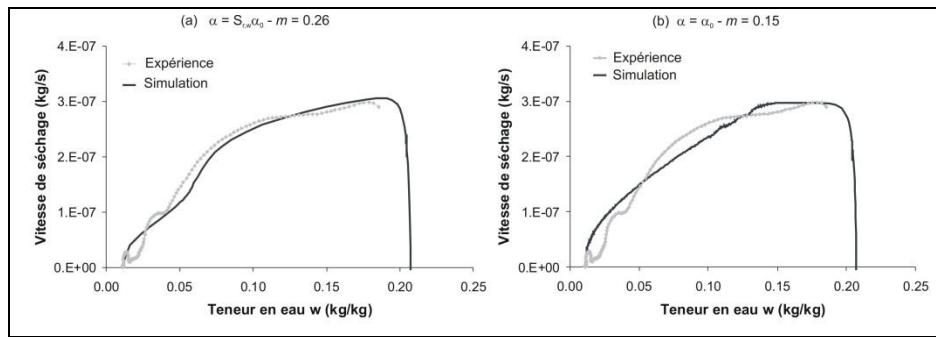


Figure 5. Courbe de séchage d'un essai sur limon avec $h_r = 30\%$ - $T_{air} = 50^\circ\text{C}$ - $v = 1\text{m/s}$) – Comparaison entre résultat expérimental et numérique (a) en modifiant l'expression de la condition limite fluide et (b) en modifiant la courbe de perméabilité relative à l'eau

4. Analyse des mécanismes de transfert

Les modélisations thermo-hydrauliques permettent d'analyser les mécanismes de transfert au sein du matériau durant le séchage. L'eau liquide est-elle principalement conduite par advection jusqu'à la surface de l'échantillon, avant d'être évaporée en paroi ? Ou observe-t-on plutôt une évaporation de l'eau au sein de l'échantillon suivi de la diffusion de la vapeur jusqu'à la surface ?

Lorsque le coefficient de transfert de masse dépend du degré de saturation (Figure 6 (a)), l'advection d'eau liquide jusqu'en paroi est dans un premier temps le mécanisme prépondérant. Une fois que le matériau se désature, les flux d'advection au sein du matériau diminuent et deviennent le facteur limitant les échanges. La diffusion de vapeur vers la paroi contribue alors majoritairement à alimenter la couche limite en vapeur d'eau. Un front d'évaporation se développe et pénètre alors vers le cœur de l'échantillon.

Par contre, lorsque la perméabilité à l'eau décroît plus rapidement avec le degré de saturation ($m = 0.15$), on constate que l'advection d'eau liquide reste le mécanisme de transfert interne le plus important durant tout le séchage du limon (Figure 6 (b)). Le drainage étant plus faible, les gradients de pression à proximité de la paroi sont plus importants (Figure 6 (b)). Ces gradients importants favorisent les flux d'advection d'eau liquide. On en arrive donc à la conclusion paradoxale que

moins un milieu poreux est perméable, plus l'advection de l'eau liquide jusqu'en paroi contribue de façon importante aux échanges de vapeur avec l'extérieur. Cette conclusion rejoint celle de Coussy (2004), qui avait montré que pour des matériaux peu perméables, la vaporisation de l'eau au sein du matériau poreux suivi par la diffusion de la vapeur jusqu'à la paroi était négligeable.

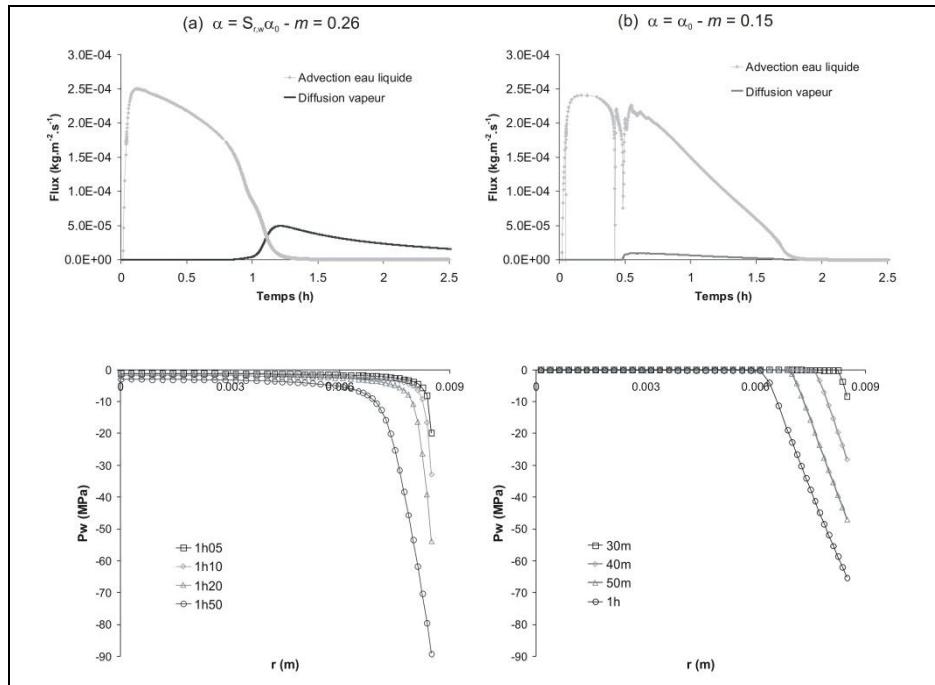


Figure 6. Evolution temporelle des flux à la surface de l'échantillon (premier élément à mi-hauteur de l'échantillon) et profils de pressions d'eau (le long d'une coupe horizontale à mi-hauteur de l'échantillon) (a) avec un coefficient de transfert variable et $m = 0.26$ et (b) avec un coefficient de transfert constant et $m = 0.15$

5. Conclusions

Des essais de séchage convectif ont été réalisés sur le limon d'Awans. La modélisation thermo-hydraulique de ces essais est présentée dans cet article. Une condition limite thermo-hydraulique non classique est développée. Elle prend en compte l'existence d'une couche limite en paroi, au sein de laquelle les transferts de vapeur d'eau et d'énergie ont lieu. Ces échanges sont contrôlés par des coefficients de transfert de masse et de chaleur. Afin de reproduire les données expérimentales, deux approches ont été envisagées. Dans un premier temps, une calibration de la courbe de perméabilité relative à l'eau est envisagée. Une analyse des résultats

numériques montre alors que les transferts au sein de l'échantillon sont contrôlés principalement par l'advection d'eau liquide suivie d'évaporation en paroi. Une autre approche pour reproduire la cinétique de séchage a été de supposer une dépendance du coefficient de transfert de masse avec le degré de saturation. Avec une telle condition limite, les transferts internes sont dans un premier temps contrôlés par l'advection d'eau liquide jusqu'à la surface, suivie de l'évaporation de l'eau. Dans un second temps, un front de vapeur se développe et avance vers le cœur de l'échantillon. La diffusion de la vapeur jusqu'à la surface permet alors l'alimentation de la couche limite en fluide.

Ces modélisations montrent que deux expressions de nos modèles constitutifs permettent de reproduire la cinétique de désaturation observée expérimentalement. Cependant, les mécanismes de transfert au sein du matériau diffèrent selon l'approche choisie. Cette différence de comportement se répercute sur la forme des courbes de séchage. En effet, lorsque la diffusion de la vapeur d'eau devient le processus prépondérant, une modification dans la concavité de la courbe de séchage est numériquement observée, correspondant à un changement dans la cinétique de séchage pour $w \approx 0.6$ (Figure 5 (a)). De nouveaux essais en laboratoire ainsi qu'un suivi par tomographie à rayons X de l'avancée d'un éventuel front de séchage durant la désaturation devraient permettre de valider une des deux approches constitutives.

6. Bibliographie

- Baroghel-Bouny V., Mainguy M., Coussy O., « Isothermal drying process in weakly permeable cementitious materials - Assessment of water permeability », *Material Science of Concrete. Special Volume: Ion and Mass Transport in Cement Based Materials*. Eds. R.D. Hooton, M.D.A. Thomas, J. Marchand, J.J. Beaudoin, 2001, p. 59-80.
- Coumans W.J., « Models for drying kinetics based on drying curves of slabs », *Chemical Engineering and Processing*, vol. 39, 2000, p. 53-68.
- Coussy O., *Poromechanics*, Wiley, London, 2004.
- Kowalski S.J., *Thermomechanics of drying processes*, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Springer, 2003.
- Gerard P., Charlier R., Chambon R., Collin F., « Influence of evaporation and seepage on the convergence of a ventilated cavity », *Water Resources Research*, vol. 44, 2008, W00C02, doi:10.1029/2007WR00650.
- Gerard P., Léonard A., Masekanya J.-P., Charlier R., Collin F., « Study of soil-atmosphere moisture exchanges through convective drying tests in non-isothermal conditions », *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 12, 2010, p. 1297-1320.
- Gerard P., Impact des transferts de gaz sur le comportement poro-mécanique des matériaux argileux. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 2011.
- Key R.B., *Drying. Principles and practice*, Pergamon Press, New York, 1972.

Masekanya J.-P., Stabilité des pentes et saturation partielle – Etude expérimentale et modélisation numérique, Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 2008.

Nadeau J.-P., Puiggali J.R., Séchage - Des processus physiques aux procédés industriels, Technique et Documentation – Lavoisier, Paris, France, 1995.