

Analyse adimensionnelle d'un modèle de transfert Thermo-Hygro-Aéraulique : Application à l'étude comparative d'éléments de parois et de leurs pouvoirs tampon

Zakaria Slimani¹, Abdelkrim Trabelsi^{1*}, Virgone Joseph¹

¹ Centre De Thermique De Lyon, CNRS, UMR 5008, INSA de Lyon, Université de Lyon 1.

Bât Sadi Carnot - 9 Rue de la Physique

69621 Villeurbanne cedex, France

*abdelkrim.trabelsi@univ-lyon1.fr

RESUME. Les simulations des transferts de chaleur et de masse dans l'enveloppe du bâtiment est une pratique qui se démocratise. Les modèles de la littérature sont basés sur l'écriture des équations de bilans thermique et massique. Pour un grand nombre, ils admettent des données d'entrée constantes ou décrites succinctement. Leur formulation est dimensionnelle ce qui rend difficile l'analyse des mécanismes mis en jeu. Cet article présente une analyse adimensionnelle d'un modèle de transfert Thermo-Hygro-Aéraulique (THA). Les propriétés thermophysiques des matériaux sont prises fonction des variables d'état décrivant le système. Les nombres adimensionnels du modèle ont permis d'estimer les mécanismes qui contrôlent les transferts THA. Une analyse de leur ordre de grandeur a été réalisée pour la comparaison du comportement hygrothermique de différents matériaux. La méthodologie présentée dans cette étude peut s'avérer très utile en phase conception car elle permet de comparer relativement facilement différentes familles d'éléments de paroi.

MOTS-CLÉS : Analyse adimensionnelle ; transfert de chaleur, d'air et d'humidité, matériaux de construction.

ABSTRACT. The simulation of Heat Air and Moisture (HAM) transfers in building envelope is a practice which is becoming increasingly popular. The models of the literature are based on the writing of the equations of heat and mass balances. These models admit a constant input data or described in a very brief way. Their formulation is dimensional which makes the analysis of the involved mechanisms difficult. This paper presents a dimensionless analysis of a HAM transfer model. The properties of materials are taken functions of the variables of state describing the system. The studied problem is of a complex nature because it is strongly coupled and non-linear. The dimensionless numbers of the model where used to estimate the mechanisms that control heat, air and moisture transfer. An analysis of their order of magnitude was achieved to compare of the hygrothermal behavior of different materials. The methodology presented in this study can be useful in the design phase because it allows comparing relatively easily different groups of wall elements.

KEYWORDS: Dimensionless analysis, Heat Air and Moisture transfers, building materials

1. INTRODUCTION

L'enveloppe du bâtiment est soumise à des sollicitations à la fois thermique et hydrique. Pour certains éléments d'enveloppe, en particulier les isolants (matériaux à forte porosité et faible conductivité thermique), les transferts de chaleur et de masse sont fortement couplés (Mendes et al. 2003). En effet, les constantes cinétiques telles que le coefficient de diffusion de vapeur d'eau ou

encore le phénomène de transfert de masse par thermo-diffusion dépendent directement de la température et de son gradient. Inversement le transfert de masse impacte le transfert de chaleur à travers la contribution de la conduction dans la phase liquide (Peishi and Pei 1989) et le changement de phase liquide/vapeur sans compter le phénomène d'advection.

Les principaux mécanismes de transfert d'humidité dans les matériaux poreux de construction sont la diffusion de vapeur, le transfert par capillarité, l'advection ou la combinaison des trois. L'importance d'un mécanisme par rapport à l'autre dépend de l'état hydrique du matériau. Ce dernier est étroitement lié aux phénomènes d'adsorption et de rétention caractérisés par les isothermes de sorption/désorption et les courbes de rétention d'eau. Actuellement les outils de simulation énergétique des bâtiments mettent généralement l'accent sur la prévision de consommation d'énergie thermique et simplifient les effets de l'humidité qui se manifestent dans les matériaux hygroscopiques.

Une approche adaptée pour l'étude des mécanismes de transfert et de leur concurrence est l'analyse adimensionnelle. Concernant les transferts dans les matériaux poreux, on peut citer les travaux de (Younsi, Kocaefe, and Kocaefe 2006) et ceux de (Dantas, Orlande, and Cotta 2002) qui proposent une étude paramétrique sur les nombres adimensionnels dans le cas d'un procédé industriel qui est le séchage du bois. Dans le même ordre d'idée, notre étude a pour objectif l'analyse des interactions des différents mécanismes de transferts en intégrant en plus l'effet de la convection pour une application spécifique au bâtiment. L'étude présentée dans cet article comporte 4 parties :

1. Le développement d'un modèle de transferts Thermo-Hygro-Aérauliques (THA) intégrant les principaux mécanismes mis en jeu.
2. La formulation adimensionnelle de ce dernier dans l'objectif d'identifier les nombres adimensionnels clés déterminant le comportement hygrothermique d'un élément d'enveloppe.
3. Une 1ère analyse de ces nombres pour comparer le comportement de différents matériaux dont le bois.
4. Enfin, en guise d'application, une analyse portant sur une caractéristique standardisée du pouvoir tampon des matériaux à savoir le MBV. Les propriétés de transfert et de stockage sont prises variables ce qui permet de rendre compte de manière plus fines des interactions qui peuvent exister lors du transfert.

2. MODÈLE THERMO-HYGRO-AÉRAULIQUE (THA) ET FORMULATION ADIMENSIONNÉE

Le modèle présenté dans cet article est basé sur les travaux de thèse de Tariku (Tariku 2008). Les potentiels qu'on a retenus sont la température (T), l'humidité absolue (ρ^v) et la pression de l'air (P). Le modèle est construit sur la base de 3 équations de conservation : d'énergie, d'humidité (sous forme liquide et vapeur) et d'air sec. L'équation générale qui décrit le transfert d'humidité dans un milieu poreux, est donnée par (1), elle résulte de la somme des équations de conservations des espèces de l'eau liquide et la vapeur d'eau avec comme phénomènes de transfert la diffusion et la capillarité exprimés respectivement par la loi de Fick et loi de Darcy (Tariku, Kumaran, and Fazio 2010):

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(\rho^v V) + \text{div}\left(-D_v \frac{\partial \rho^v}{\partial x_i}\right) + \text{div}\left(k_L \left(\frac{\partial P_S}{\partial x_i} + \rho_w \cdot g\right)\right) = 0 \quad (1)$$

Où : $\frac{\partial w}{\partial t}$ représente le taux d'accumulation de l'humidité dans le volume de contrôle où w représente la teneur en eau (kg/m^3), et $\text{div}(\rho^v V)$ le divergent du flux de vapeur par advection où V est la vitesse de l'air qui se traduit aussi par la loi de Darcy. En ayant recours à l'équation de Kelvin, qui relie pression capillaire et humidité, on obtient la 1ère équation constitutive du modèle étudié :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div} \left(D_m \frac{\partial \rho^v}{\partial x_i} + D_{l,T} \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\rho^v \cdot \delta_a}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

La conservation de l'énergie totale peut être exprimée en fonction de l'enthalpie h , par l'équation (3)

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = -\text{div}(\rho V h) - \text{div}(q) + \dot{Q}_s \quad (3)$$

Où : q est le terme de diffusion, $\text{div}(\rho V h)$ est le terme de transfert de chaleur par advection et Q_s est le terme de source. En substituant l'enthalpie par l'enthalpie du mélange (d'humidité, d'air et de masse solide) dans le terme d'accumulation $\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}$ et en introduisant les équations de conservation de l'eau liquide, de la vapeur d'eau et d'air sec on obtient l'équation générale (4) qui traduit la conservation de chaleur dans le milieu poreux :

$$\rho_m \cdot C_{P,eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(\lambda_{eff} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} - J_v \cdot (H_{fg} + T \cdot (C_{PL} - C_{PV})) \right) - (J_L \cdot C_{PL} + J_a \cdot C_{Pa} + J_v \cdot C_{PL}) \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4)$$

Avec : J_v est le flux de vapeur (diffusion et advection) et J_L le flux de liquide

Pour les applications du bâtiment, l'air est considéré comme incompressible en raison des très faibles vitesses d'air ainsi que les faibles variations en température et pression rencontrées dans la pratique. Par conséquent, l'équation de conservation de la masse d'air sec est donnée par l'équation (5)

$$\text{div} \left(-\delta_a \frac{\partial P}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (5)$$

Pour les conditions aux limites, on considère que la paroi est exposée à un flux de transfert de masse et de chaleur par convection en tenant compte du changement de phase ((6) et (7))

$$-\lambda_{eff} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h_q (T - T_i) + h_m (\rho^v - \rho_i^v) \cdot H_{fg} \quad (6)$$

$$-D_m \cdot \frac{\partial \rho^v}{\partial x} = h_m (\rho^v - \rho_i^v) \quad (7)$$

Pour adimensionner le modèle on procède à un changement de variables. Les points de référence pour les changements de variables i et j dans les équations ci-dessus représentent respectivement les conditions intérieures et extérieures.

$$\theta = \frac{T - T_j}{T_i - T_j}; \quad \psi = \frac{\rho^v - \rho_j^v}{\rho_i^v - \rho_j^v}; \quad \pi = \frac{P - P_j}{P_i - P_j}; \quad \omega = \frac{w - w_j}{w_i - w_j}; \quad X = \frac{x}{L}; \quad \tau = \frac{t \cdot a_t}{L^2}; \quad \nabla = L^{-1} \nabla^*$$

L'introduction de ces nombres adimensionnels dans les équations de transfert de chaleur d'air et d'humidité (5), (4) et (2) donne le modèle THA adimensionné suivant :

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \nabla^* \cdot \left(Lu \cdot \left(\nabla^* \psi + Pn \nabla^* \theta + \frac{Pe_a}{Pe_v} \nabla^* \pi \right) \right) \quad (8)$$

$$\eta_1 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \nabla^* \cdot \left(\eta_2 \cdot \nabla^* \theta + Lu_v \cdot (Ko + Ko_{lv}) \nabla^* \psi + Lu \cdot \frac{Pe_a}{Pe_v} \cdot (Ko + Ko_{lv}) \nabla^* \pi \right) - (Pe_v \cdot \eta_3 \nabla^* \psi + Pn \cdot Pe_v \cdot \eta_3 \nabla^* \theta + Pe_a \cdot (\eta_3 + \eta_4) \nabla^* \pi) \nabla \theta \quad (9)$$

$$\nabla^* \cdot (Pe_a \nabla \pi) = 0 \quad (10)$$

Les conditions aux limites (6) et (7) deviennent :

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = Bi_q (1 - \theta) - Ko \cdot Lu \cdot Bi_m (1 - \Psi) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -Bi_m(1 - \Psi) \quad (12)$$

Les nombres adimensionnels introduits sont :

Les nombres connus

$Lu = \frac{D_m}{c_m \cdot a_T}$	Le nombre de Luikov	$Pn = \frac{D_{L,T} \Delta T}{D_m \Delta \rho_v}$	Le nombre de Posnov
$Lu_v = \frac{D_v}{c_m \cdot a_T}$	Le nombre de Luikov vapeur	$Ko = \frac{\Delta w \cdot H_{fg}}{\rho_m c_{ps} \Delta T}$	Le nombre de Kossovitch
$Pe_a = \frac{v_a \cdot L}{a_T}$	Le nombre de Peclet	$Bi_q = \frac{h_q \cdot L}{\lambda_{eff}}$	Nombre de Biot thermique
$Pe_v = \frac{v_v \cdot L}{a_T}$	Le nombre de Peclet	$Bi_m = \frac{h_m \cdot L}{D_m}$	Nombre de Biot massique

Autres nombres adimensionnels :

$Ko_{1v} = \frac{(C_{pv} - C_{pl}) \cdot T \cdot \Delta w}{\rho_m \cdot C_{ps} \cdot \Delta T}$	$\eta_1 = \frac{C_{p_eff}}{C_{psec}}$	$\eta_2 = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda}$	$\eta_3 = \frac{\rho_v C_{pL}}{\rho_m C_{psec}}$	$\eta_4 = \frac{\rho_a C_{pa}}{\rho_m C_{psec}}$
---	--	--	--	--

La réécriture du modèle sous forme adimensionnée fait apparaître des nombres connus qu'on retrouve dans les travaux ((Younsi, Kocafe, and Kocafe 2006), (Dantas, Orlande, and Cotta 2002), (Pandey, Srivastava, and Mikhailov 1999) et d'autre un peu moins connu. D'abord les nombres η_1 et η_2 qui expriment le fait d'avoir des propriétés thermo-physique qui dépendent de l'état hydrique du matériau. Et η_3 et η_4 qui traduisent respectivement la capacité thermique de l'humidité et celle de l'air sec par rapport à capacité thermique du matériau à l'état sec. On voit apparaître aussi les nombres de Peclet différenciés pour la vapeur et l'air. Tous les nombres adimensionnels obtenus sont variables et traduisent les mécanismes les plus influents selon l'état hydrique et thermique du matériau.

3. ANALYSE COMPARATIVE DE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

L'analyse de l'ordre de grandeur des nombres adimensionnels permet d'avoir une ébauche sur le comportement THA d'un matériau. Ainsi, les comportements de 3 matériaux ont pu être comparés. Les conditions intérieures et extérieures prisent comme référence pour l'adimensionnement des variables d'état sont respectivement : ($T_i=20^\circ\text{C}$; $HR_i=75\%$), ($T_j=5^\circ\text{C}$; $HR_j=33\%$). Les caractéristiques des matériaux étudiés sont issues de la littérature (voir Tableau 1). Il est à noter que ce type d'information est difficile à obtenir pour 2 raisons principales :

- Les caractéristiques sont définies par rapport à leurs modèles associés. Aujourd'hui peu d'auteurs intègre l'effet de la pression totale sur les transferts d'où un manque de données sur la perméabilité à l'air.
- Les essais de caractérisation pour l'évaluation des propriétés hydrique étant très lent, elles sont souvent décrites de manière sommaire pour un ou deux états hydrique.

Cela explique que certaines données sont manquantes sur le Tableau 1 et que l'analyse porte uniquement sur l'état hydrique et thermique qui correspond à 50% d'humidité relative et une température de 20°C , pour une paroi d'une épaisseur de 10cm.

Compte tenu des données expérimentales disponibles, les contributions de la thermo-diffusion et de l'advection n'ont pu être évaluées que pour la fibre de bois. Pour ce dernier, les mécanismes prédominants dans le transfert massique sont la diffusion et le transfert par capillarité. La thermo-diffusion et l'advection ne représente que 3% du flux total.

50% HR T 20°C			
Matériaux	Brick	épicéa	Fibre de bois
Capacité hydrique $C_m = \frac{\partial w}{\partial \rho_v}$ (-)	221	4724	4586
Coefficient de diffusion de vapeur d'eau $D_v \cdot 10^6$ (m ² /s)	4.1	2	1.9
Perméabilité à l'air $K_a \cdot 10^8$ (s)	-	-	1.5
$D_{LT} \cdot 10^{11}$	-	-	1.2
Coefficient de diffusion de l'humidité $D_m \cdot 10^6$ (m ² /s)	4.1	2	2.7
Diffusivité hydrique $a_M \cdot 10^{10}$ (m ² /s) $\left(a_M = \frac{D_m}{C_m}\right)$	183	4.3	5.8
Diffusivité à la vapeur $a_v \cdot 10^{10}$ (m ² /s) $\left(a_v = \frac{D_v}{C_m}\right)$	183	4.3	4.1
Conductivité thermique à l'état sec λ_{sec} (W/m.K)	1	0.14	0.1
Densité du matériau à l'état sec ρ_m (kg/m ³)	1600	430	589
Chaleur spécifique du matériau sec $C_{p_{sec}}$ (J/K.kg)	1000	2400	1551
Diffusivité thermique $a_T \cdot 10^7$ (m ² /s) $\left(a_T = \frac{\lambda_{sec}}{\rho_m C_{p_{sec}}}\right)$	6.3	1.4	1.1
Coefficient d'échange thermique hq (W/m ² .K)	25	25	25
Coefficient d'échange massique hm (m/s)	0.02	0.02	0.02
MBV (g/% HR/m ²)	0.48	1.16	2.75
$Lu \cdot 10^3$	29.3	3.2	5.3
$Lu_v \cdot 10^3$	29.3	3.2	3.7
Pn	-	-	0.006
$\eta_3 \cdot 10^5$	2.3	3.5	4.0
$\eta_4 \cdot 10^4$	7.5	12	13
Ko	0.2	8.1	8.9
$Ko_{iv} \cdot 10^3$	2.6	86.3	94.6
Pe_a	-	-	0.46
Pe_v	5.3	12.2	19.8
Bi_q	2.5	17.9	25.0
Bi_m	511	1023	781

Tableau 1 : Confrontation des propriétés hygrothermique et coefficients adimensionnels de transfert THA d'une paroi de 10 cm en brique, en épicéa (Rode et al. 2005) et en fibre de bois (Perrin 2012).

Pour ce qui est de l'équation de bilan thermique (9), le terme dominant est là aussi la diffusion. Le changement de phase représente que 3% de la chaleur mise en jeu. Les termes restants en lien avec les nombres η_3 et η_4 sont insignifiants (voir Tableau 1). Concernant les conditions aux limites l'analyse des nombre de Biot montre que c'est le transfert dans l'enveloppe qui contrôle le transfert globale massique contrairement au transfert thermique. Le comportement sera insensible à la variation locale du coefficient d'échange massique. La comparaison des matériaux entre eux sur la base des nombres adimensionnels montre que la brique présente un comportement différent des autres qui rappellent le sont des matériaux bois et dérivés. La comparaison du nombre de Luikov montre que l'équilibre hydrique est atteint plus rapidement dans le cas de la brique.

4. ÉTUDE DE CAS

Afin comparer des matériaux de construction et d'analyser les mécanismes hygrothermiques mises en jeu, on se propose d'étudier le scénario proposé par le NORDEST pour la mesure de la valeur

tampon d’humidité d’un matériau nommé MBV_{8h} (Rode et al. 2005). Cette grandeur a été introduite et analysée dans une étude réalisée par un groupement de laboratoires pour 2 raisons majeures. La 1ère raison évidente réside dans le fait que le pouvoir tampon de l’enveloppe joue un rôle déterminant sur le comportement hydrique du bâtiment tout entier. La 2ème s’explique par le fait qu’il n’y a pas de grandeur standardisée traduisant ce pouvoir tampon qui soit simple à interpréter.

Le MBV_{8h} correspond à la quantité d’humidité stockée ($G(t)$) par pourcentage de variation d’humidité par surface exposée (voir Figure 1). L’échantillon est exposé à une humidité relative de 75% durant 8h, puis 16 heures à 33%.

$$MBV_{8h} = \frac{G_{max} - G_{min}}{S \cdot \Delta HR\%} \tag{13}$$

G_{max} , G_{min} représente respectivement la masse d’eau stockée maximale et minimale en grammes, d’un cycle à 75% HR.

Contrairement au chargement climatique préconisé par le NORDTEST (qui suppose un gradient d’humidité entre l’intérieur du matériau et l’extérieur), nous avons soumis le matériau, une paroi d’une épaisseur de 10cm à des gradients de température et de pression totale dans l’objectif de voir la contribution de tous les mécanismes (Figure 1). L’état initial de cette paroi est de 40% en humidité relative et 20°C en température.

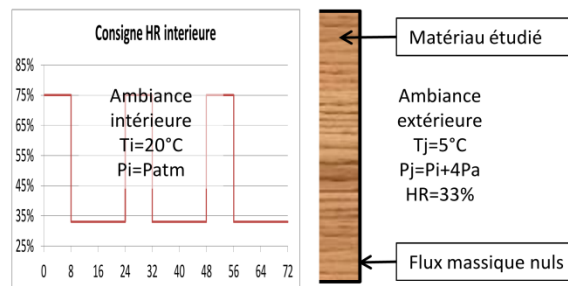


Figure 1 : Schéma représentatif du scénario étudié.

Le matériau que nous avons choisi de tester est la fibre de bois. Il s’agit d’un panneau de fibre de bois à densité moyenne. Ce matériau a été caractérisé dans le cadre du projet ANR HYGRO-BAT (Perrin 2012) sachant qu’il a été choisi comme matériau de référence dans un benchmark numérique dans ce projet. Les propriétés de ce matériau à 50% d’humidité relative et à une température de 20°C figurent sur le Tableau 1.

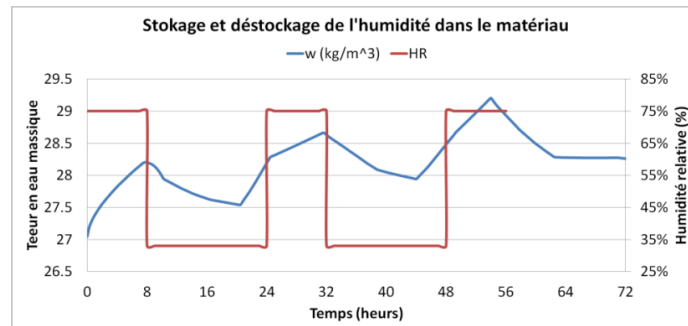


Figure 2 : Stockage et déstockage de l’humidité durant les cycles.

La simulation d’un test de MBV pour le matériau fibre de bois telle que décrite dans le paragraphe précédent donne le résultat présenté sur la figure 2. On retrouve les 3 cycles de charge/décharge en

humidité relative et la teneur en eau résultante. À partir de ces données-là et moyennant la définition du MBV l'équation (13), on retrouve une valeur de MBV de 2,75 (g/m².%HR) ce qui correspond à un matériau avec un pouvoir tampon excellent d'après la classification du NORDTEST (Rode et al. 2005).

Les nombres adimensionnels clés qui régissent le transfert de masse (8) sont les nombres de Posnov « Pn » et de Peclet (air et vapeur) « Pea/Pev » pondérés par le nombre de Luikov « Lu ». Afin de voir leur importance respective, nous avons tracé leur évolution au cours du temps lors du test de MBV (voir Figure 3). La comparaison de ces nombres permet de mettre en évidence que le mécanisme prédominant dans le transfert de masse est la diffusion sous gradient de concentration en vapeur au détriment de la convection et de la thermo-diffusion (1 >> Pn et >> Pea/Pev) où : Pn = 0,12 et Pea/Pev = 0,02.

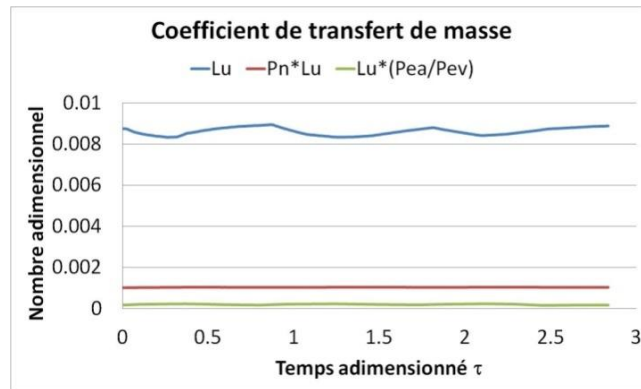


Figure 3 : Variation des coefficients qui gouverne le transfert de masse.

Pour le transfert de chaleur qui est décrit par l'équation (9) les termes moteurs sont : $\{\eta_2\}$, $\{Pn \cdot Pe_v \cdot \eta_3\}$, $\{Lu_v \cdot (Ko + Ko_{lv})\}$, $\{Pe_v \cdot \eta_3\}$, $\{Lu \cdot \frac{Pe_a}{Pe_v} \cdot (Ko + Ko_{lv})\}$ et $\{Pe_a \cdot (\eta_3 + \eta_4)\}$

De la même manière que précédemment, on analyse de l'ordre de grandeur de ces nombres. Sur les 6 combinaisons de nombres qui décrivent notre physique, seule 2 sont prépondérants. Il s'agit de $\{\eta_2\}$ $\{Lu_v \cdot (Ko + Ko_{lv})\}$. Donc les phénomènes dominant sont la conduction et dans de moindre mesures le changement de phase.

Sur la Figure 4 on peut voir que les nombres $\{\eta_1\}$ et $\{\eta_2\}$ varient en fonction du temps. Ils montrent la variation la plus importante avec un maximum 1.18 et un minimum 1.11, ce qui montre que même pour la valeur la plus petite le $\{\eta_2\}$ la diffusion reste le phénomène qui contrôle le transfert.

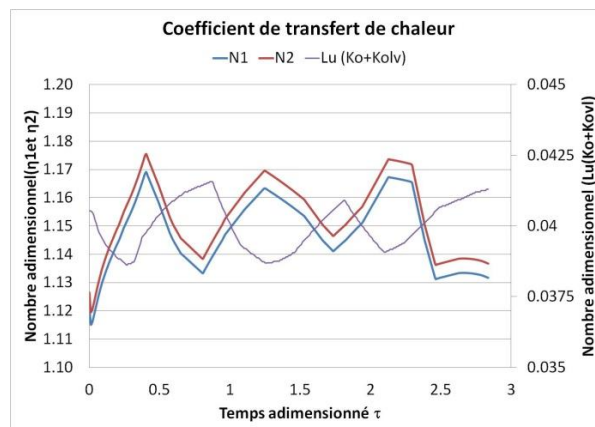


Figure 4 : Variation des coefficients qui gouverne le transfert de chaleur

L'utilité d'étudier ses nombres en les exprimant de manière variable, concerne les matériaux dont la variation des nombre adimensionnels induirait une hiérarchie différente des mécanismes dominant. C'est le cas des matériaux isolant pour de forte humidité relative.

5. CONCLUSION

Le modèle transfert de chaleur d'air et de masse adimensionné nous a permis de mettre en avant des nombres adimensionnels qui représentent les mécanismes de transfert durant une sollicitation thermo-hydrrique d'un matériau du bâtiment. L'analyse de l'ordre de grandeur de ces nombres permet la prédiction du comportement du matériau et de définir les mécanismes qui commande les transferts de masse et de chaleur. Les résultats obtenus pour la fibre de bois montrent que le transfert de masse est en totalité régi par diffusion de vapeur. Le transfert thermique est régi par la conduction avec un faible apport de chaleur latente d'évaporation, cela pour les sollicitations hygrothermiques étudiées. Pour d'autres types de sollicitations ou d'autres matériaux de construction avec des propriétés de transferts de chaleur et de masse différentes, les mécanismes qui contrôlent les transferts peuvent être très différents.

L'analyse proposée dans cette étude rend possible l'ébauche du comportement d'un matériau avec une simple estimation de l'ordre de grandeur des nombres adimensionnels.

Remerciements : ce travail a reçu le soutien de l'Agence Nationale de Recherche (ANR), projet Hygrobat, ANR-10-HABISOL-005-01

6. BIBLIOGRAPHIE

- Dantas, L.B, H.R.B Orlande, and R.M Cotta. 2002. "Estimation of Dimensionless Parameters of Luikov's System for Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Media." *International Journal of Thermal Sciences* 41 (3): 217–27. doi:10.1016/S1290-0729(01)01310-2.
- Mendes, N, F.C Winkelmann, R Lamberts, and P.C Philippi. 2003. "Moisture Effects on Conduction Loads." *Energy and Buildings* 35 (7): 631–44. doi:10.1016/S0378-7788(02)00171-8.
- Pandey, R. N., S. K. Srivastava, and M. D. Mikhailov. 1999. "Solutions of Luikov Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies Through Matrix Calculus: a New Approach." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42 (14): 2649–60.
- Peishi, Chen, and David C. T. Pei. 1989. "A Mathematical Model of Drying Processes." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 32 (2): 297–310. doi:10.1016/0017-9310(89)90177-4.
- Perrin, B. 2012. "Rapport Préliminaire Sur La Caractérisation Des Matériaux LMDC". Projet ANR HYGRO-BAT. Laboratoire Matériaux et Durabilité des Construction (LMDC), INSA—UPS Génie Civil.
- Rode, Carsten, Ruut Peuhkuri, Lone H. Mortensen, Kurt Kielsgaard Hansen, and Berit Time. 2005. "Moisture Buffering of Building Materials". Byg rapporter - DTU Byg R126. Byg Rapport. DTU: DTU. http://www.byg.dtu.dk/Publikationer/Byg_rapporter.
- Tariku, Fitsum. 2008. "Whole Building Heat ,Air and Moisture Analysis". Montreal, Quebec, Canada: Concordia University.
- Tariku, Fitsum, Kumar Kumaran, and Paul Fazio. 2010. "Transient Model for Coupled Heat, Air and Moisture Transfer Through Multilayered Porous Media." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (15–16): 3035–44. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.024.
- Younsi, R., D. Kocaefe, and Y. Kocaefe. 2006. "Three-dimensional Simulation of Heat and Moisture Transfer in Wood." *Applied Thermal Engineering* 26 (11–12): 1274–85. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.10.029.