

CETHIL
UMR 5008



INSA | INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON



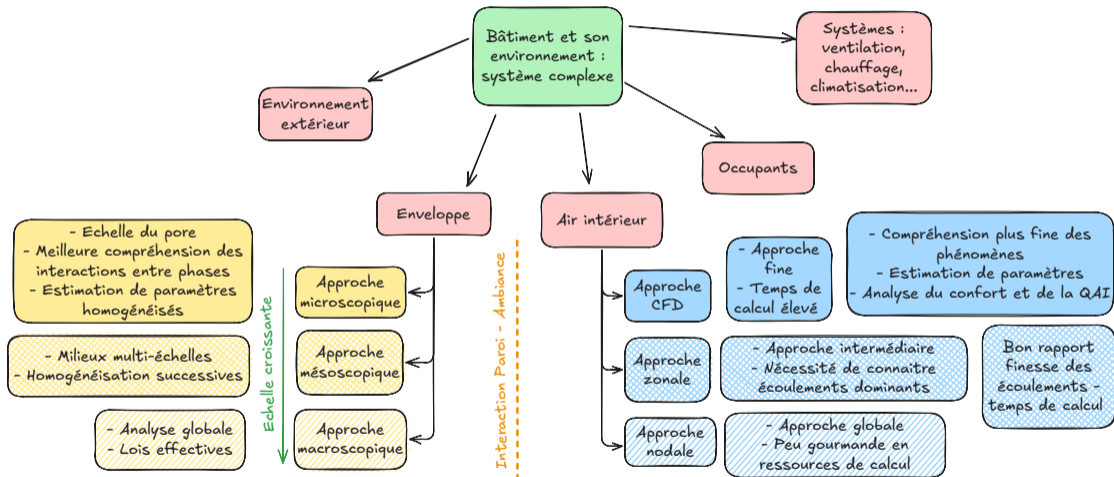
Modélisation des transferts hydrothermiques et mouvements d'eau liquide

Abdelkrim Trabelsi
abdelkrim.trabelsi@univ-lyon1.fr

Laboratoire **CETHIL** (UMR 5008)
CNRS, INSA-Lyon, **Lyon 1 Université**

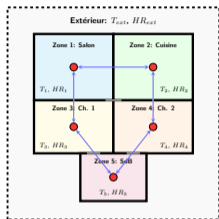
Journée de lancement du **GdR MBGS**
03 juin 2026

Approches de modélisation adaptées au bâtiment

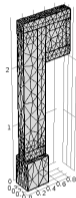


Modélisation multiéchelle enveloppe/bâtiment

Chainage



Raccordement d'échelles par
chainage entre modèles



Avantages

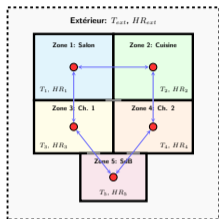
- Construction rapide du modèle
- Modélisation fine à l'échelle de l'enveloppe
- Approche conservative

Limites

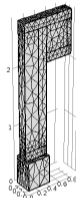
- Existence de biais lié au découplage

Modélisation multiéchelle enveloppe/bâtiment

Chainage



Raccordement d'échelles par
chainage entre modèles



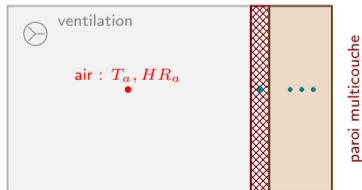
Avantages

- Construction rapide du modèle
- Modélisation fine à l'échelle de l'enveloppe
- Approche conservative

Limites

- Existence de biais lié au découplage

Modélisation dans un même environnement



Avantages

- Modélisation fine à l'échelle de l'enveloppe
- Prise en compte du couplage hygrothermique

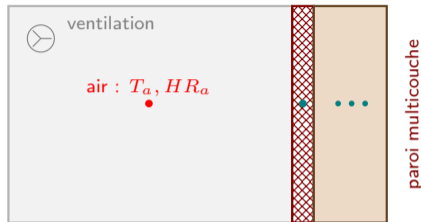
Limites

- Modèle multizone lourd à construire

Étude de cas : interaction paroi/système de ventilation ¹

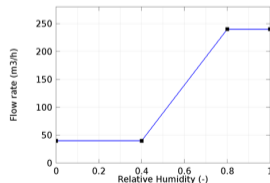
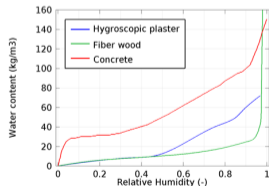
1 maison à usage d'habitation :

- Maison expérimentale "MARIA" (CSTB)
- Occupation : 2 adultes et 3 enfants
- Température de consigne 19°C
- Simulation en période d'hiver ville de Lyon



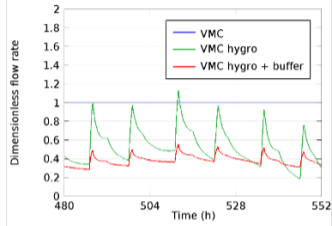
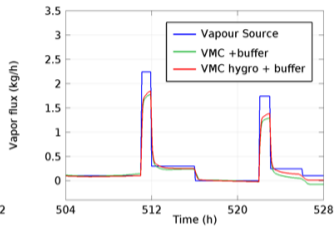
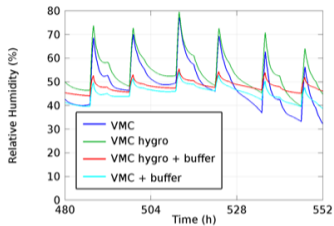
4 cas considérés :

- VMC
- VMC hygro
- VMC + tampon hygroscopique
- VMC hygro + tampon hygroscopique



1. Z. Slimani, A. Trabelsi, J. Virgone, R. Belarbi, and R. Djedjig, "Use of the Buffering Capacity of the Building Envelope for the Reduction of the Rate of Air Exchange," Energy Procedia, vol. 78, pp. 1531–1536, Nov. 2015.

Résultats



- Amortissement de l'humidité relative
- L'enveloppe reprend plus de 70% de la production de vapeur
- Diminution des déperditions de chaleur due à un renouvellement d'air moins important. Elle représente environ 70 % de réduction pendant tout le mois de janvier.

Focus sur la modélisation à l'échelle du matériau/enveloppe

Phénomènes physiques mis en jeu

$$\vec{j}_q = -\lambda^* \vec{\nabla} T$$

→ Diffusion thermique

$$\vec{j}_v = -D_v^* \rho_g \vec{\nabla} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) - \frac{\rho_v}{\rho_g} K_g^* \vec{\nabla} p_g$$

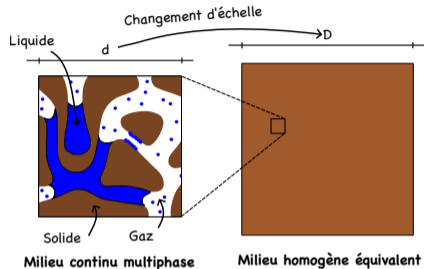
→ Mouvement de vapeur d'eau

$$\vec{j}_l = -K_l^* \vec{\nabla} p_l$$

→ Mouvement d'eau liquide

$$\vec{j}_a = -\frac{\rho_a}{\rho_g} K_g^* \vec{\nabla} p_g$$

→ Mouvement d'air



Focus sur la modélisation à l'échelle du matériau/enveloppe

Phénomènes physiques mis en jeu

$$\vec{j}_q = -\lambda^* \vec{\nabla} T$$

→ Diffusion thermique

$$\vec{j}_v = -D_v^* \rho_g \vec{\nabla} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) - \frac{\rho_v}{\rho_g} K_g^* \vec{\nabla} p_g$$

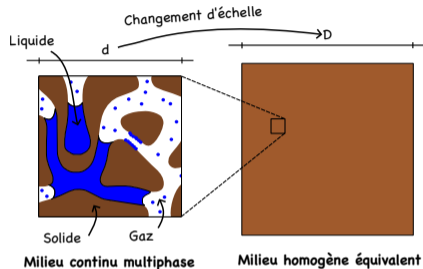
→ Mouvement de vapeur d'eau

$$\vec{j}_l = -K_l^* \vec{\nabla} p_l$$

→ Mouvement d'eau liquide

$$\vec{j}_a = -\frac{\rho_a}{\rho_g} K_g^* \vec{\nabla} p_g$$

→ Mouvement d'air



Formulation mathématique du modèle

$$\frac{\partial \rho^m}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{j}_l + \vec{j}_v)$$

$$\frac{\partial \rho^a}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{j}_a - \vec{j}_v^{\text{dif}})$$

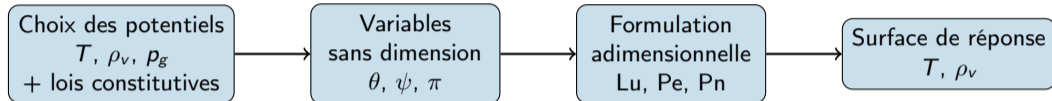
$$\rho^s c_p^* \frac{\partial T}{\partial t} + \left[(c_p^l \vec{j}_l + c_p^v \vec{j}_v + c_p^a \vec{j}_a) \right] \cdot \vec{\nabla} T = -\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_q - L_v \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_v$$

- Isotherme d'adsorption
- Loi de Kelvin
- ...

Analyse dimensionnelle

Objectif

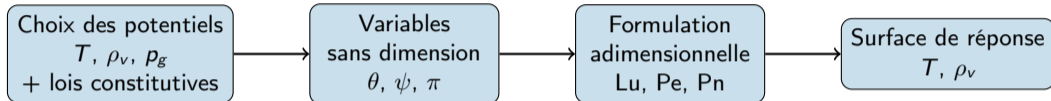
- Identification des phénomènes physiques dominants en fonction de l'état du système.



Analyse dimensionnelle

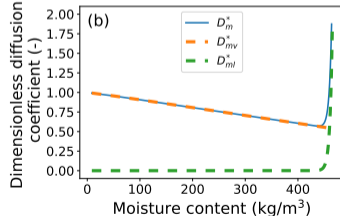
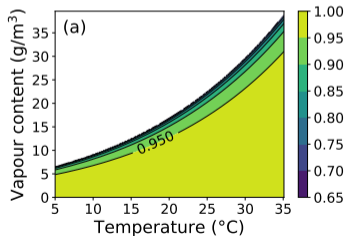
Objectif

- Identification des phénomènes physiques dominants en fonction de l'état du système.



$$\frac{\partial \rho^m}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D_m^* \vec{\nabla} \rho_v + K_m^* \vec{\nabla} \rho_g + D_T^* \vec{\nabla} T)$$

$$D_m^* = D_{mv}^* + D_{ml}^* = \left[D_v^* \left(1 + \beta \frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \right] + \left[\frac{K_l^* \rho_l r_l T}{\rho_v} \right]$$



Coefficient de diffusion d'humidité adimensionnel

Analyse dimensionnelle

Variables sans dimension

$$\theta = \frac{T - T_{\min}}{\Delta T_{\text{ref}}} \quad - \quad \psi = \frac{\rho_v - \rho_{v,\min}}{\Delta \rho_{v,\text{ref}}} \quad - \quad \pi = \frac{p_g - p_{g,\min}}{\Delta p_{g,\text{ref}}}$$

$$\Psi = \frac{\rho^m - \rho_{\min}^m}{\Delta \rho_{\text{ref}}^m} \quad - \quad X^* = \frac{x}{L} \quad - \quad t^* = \frac{t}{(L^2/a_T^d)} \quad - \quad \vec{\nabla}^* = L \times \vec{\nabla}$$

Variable	min	max	ambient
T [°C]	5	35	20
ρ_v [g/m ³]	~ 0	40	8.7
p_g [Pa]	p_g^{atm}	$p_g^{\text{atm}} + 4$	p_g^{atm}
ρ^m [kg/m ³]	0	ρ_{sat}^m	29.4

Analyse dimensionnelle

Variables sans dimension

$$\theta = \frac{T - T_{\min}}{\Delta T_{\text{ref}}} \quad - \quad \psi = \frac{\rho_v - \rho_{v,\min}}{\Delta \rho_{v,\text{ref}}} \quad - \quad \pi = \frac{p_g - p_{g,\min}}{\Delta p_{g,\text{ref}}}$$

$$\Psi = \frac{\rho^m - \rho_{\min}^m}{\Delta \rho_{\text{ref}}^m} \quad - \quad \chi^* = \frac{x}{L} \quad - \quad t^* = \frac{t}{(L^2/a_T^d)} \quad - \quad \vec{\nabla}^* = L \times \vec{\nabla}$$

Variable	min	max	ambient
T [°C]	5	35	20
ρ_v [g/m ³]	~ 0	40	8.7
p_g [Pa]	p_g^{atm}	$p_g^{\text{atm}} + 4$	p_g^{atm}
ρ^m [kg/m ³]	0	ρ_{sat}^m	29.4

Formulation adimensionnelle

$$\frac{\partial \Psi^m}{\partial t} = \vec{\nabla}^* \cdot \left[\text{Lu} \times (\vec{\nabla}^* \psi_v + \text{Pe} \vec{\nabla}^* \pi_g - \text{Pn} \vec{\nabla}^* \theta) \right]$$

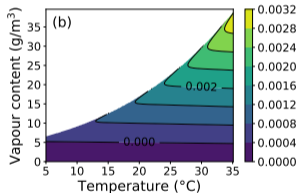
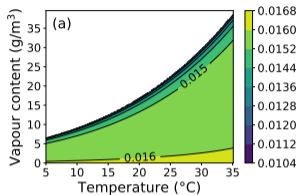
$$\text{Lu} = \frac{t \text{ caract. de diff. thermique}}{t \text{ caract. de diff. d'humidité}}$$

$$\text{Pe} = \frac{\text{advection}}{\text{diffusion d'humidité}}$$

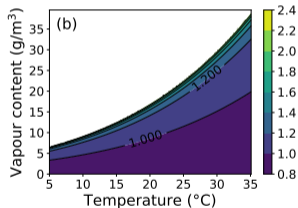
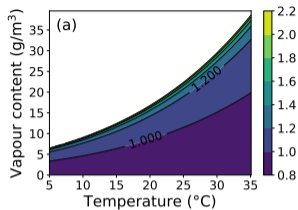
$$\text{Pn} = \frac{\text{thermodiffusion}}{\text{diffusion d'humidité}}$$

$$\chi = \frac{\lambda^*}{\lambda_{\text{ref}}} \quad \kappa_m = \frac{c_p^*}{c_{p,\text{ref}}}$$

Résultats²



Surfaces de réponse des nombres de Luikov (a)
et de Pécelet (b).



Conductivité thermique (a) et Capacité
thermique (b) adimensionnelles.

2. Abdelkrim Trabelsi, Zakaria Slimani, and Joseph Virgone, 'Response Surface Analysis of the Dimensionless Heat and Mass Transfer Parameters of Medium Density Fiberboard', International Journal of Heat and Mass Transfer, 127 (2018), pp. 623–30

Étude d'un isolant biosourcé à base de paille de riz³

92% Fibres de paille de riz



8% Fibres de polyester



Forte consommation d'énergie

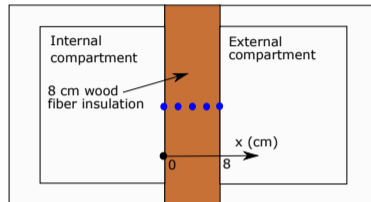
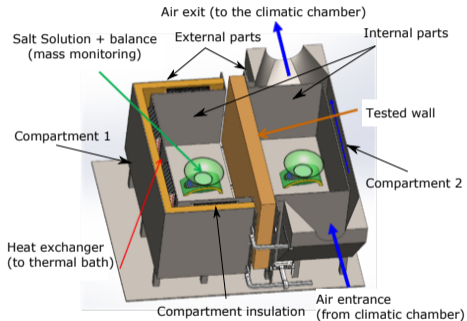


Isolant souple

3. Y. Zhou, A. Trabelsi, L. Xiang, and M. E. Mankibi, "Investigation of hygrothermal behavior of a novel bio-based panel : Experiment and numerical simulation," Clean Energy Science and Technology, vol. 3, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2025, doi : 10.18686/cest249.

Méthodologie

Description du dispositif Describe

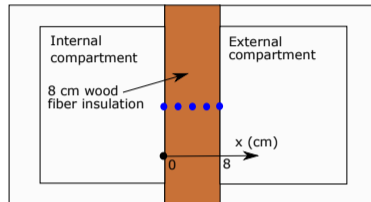
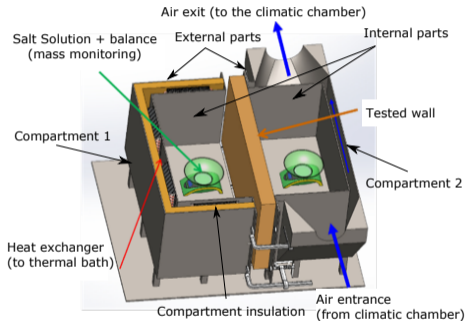


- Thermohygrometres positioned every 2 cm

Représentation schématique de l'expérience

Méthodologie

Description du dispositif Describe



• Thermohygrometres positioned every 2 cm

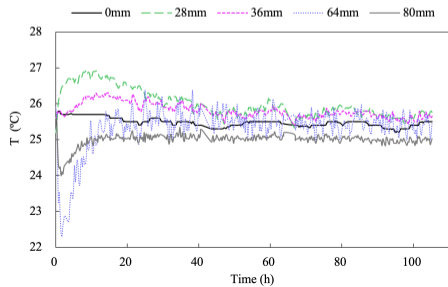
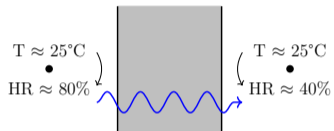
Représentation schématique de l'expérience

Séquences

- Conditions aux limites isothermes ($T = const.$; $\Delta\rho_v$) \rightarrow évaluer l'impact du transfert de vapeur sur le comportement thermique lorsque les effets latents sont dominants.
- Conditions aux limites non isothermes (ΔT ; $\Delta\rho_v$) \rightarrow comparer les effets latents aux effets purement diffusifs.
- Conditions aux limites dynamiques ($\Delta T = f(t)$; $\Delta\rho_v = g(t)$) \rightarrow analyser les effets inertiels.

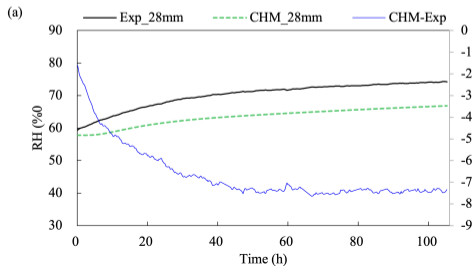
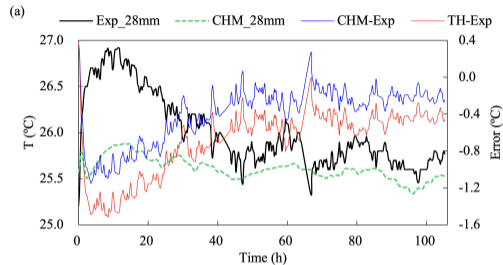
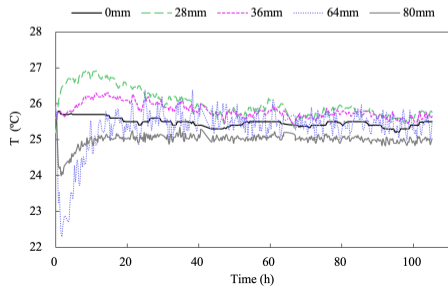
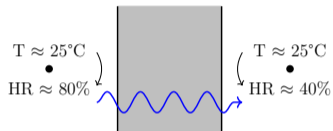
Cas isotherme

Sollicitation hygrothermique

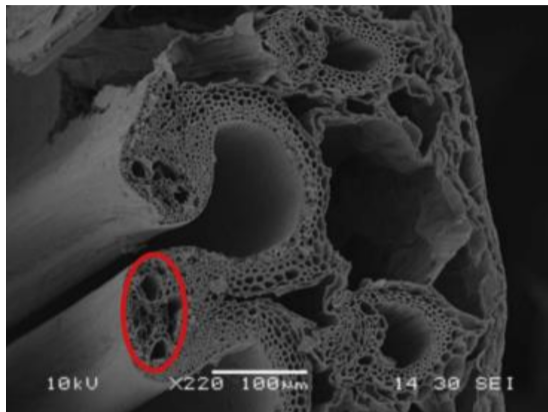


Cas isotherme

Sollicitation hygrothermique

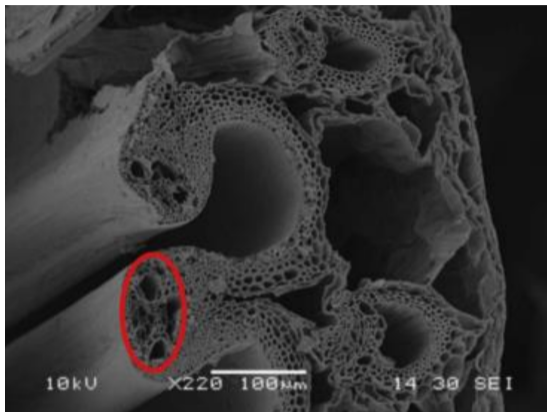


Prsie en compte des mouvements d'eau liquide

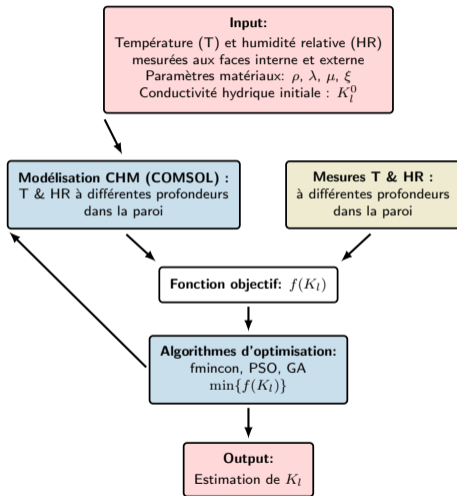


Estimation de la conductivité hydrique à partir du champs de T et de HR issus de Describe

Prsie en compte des mouvements d'eau liquide

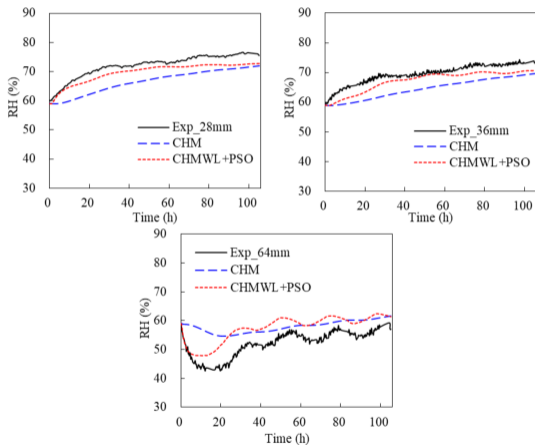


Estimation de la conductivité hydrique à partir du champs de T et de HR issus de Describe



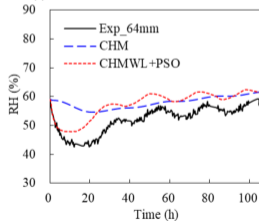
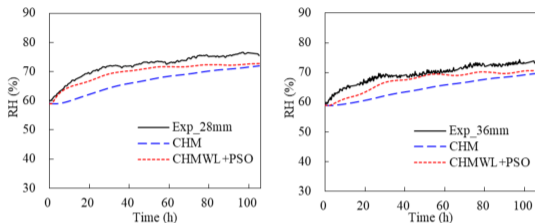
Processus pour l'estimation du paramètre K_l

Prsie en compte des mouvements d'eau liquide

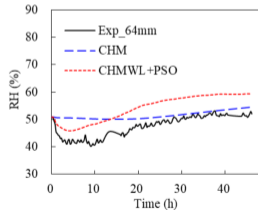
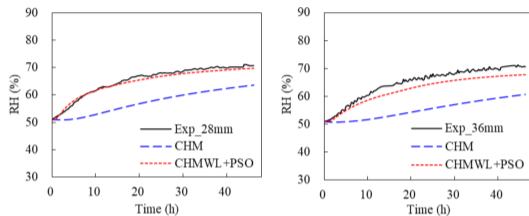


Cas dynamique

Prsie en compte des mouvements d'eau liquide



Cas dynamique



Cas non-isotherme

Conclusion et perspectives

Conclusions

- Modélisation hygrothermique adaptée au bâtiment bien identifiée
- Nécessité de prendre en compte les couplages entre les transferts de chaleur et d'humidité
- Influence de la prise en compte du mouvement de l'eau liquide évaluée

Perspectives

- Extension de la démarche aux matériaux géosourcés
- Nécessité de prendre en compte le couplage thermo-hygro-mécanique