

SOUDANI Lucile

LGCB, ENTPE
LOCIE, Université de Savoie

IBPSA France 2014
Université d'Artois, Arras

20-21 mai 2014

ÉTUDE DE LA PERTINENCE DES HYPOTHÈSES DANS LA MODÉLISATION HYGROTHERMIQUE DU PISÉ

Lucile SOUDANI

Monika WOLOSZYN

Jean-Claude MOREL

Antonin FABBRI

Pierre-Antoine CHABRIAC

Anne-Cécile GRILLET

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

INTRODUCTION

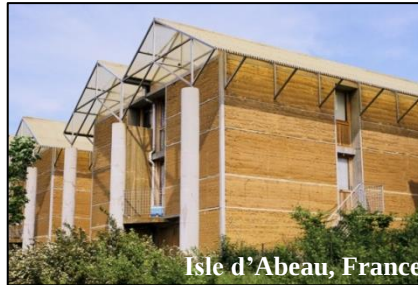
MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

INTRODUCTION

Qualités du matériau terre:



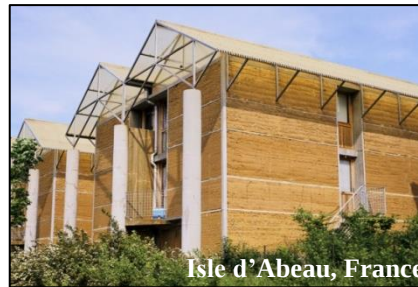
MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

INTRODUCTION

Qualités du matériau terre:



Matériau de construction le plus répandu dans le monde – habitat d'environ un tiers de la population mondiale

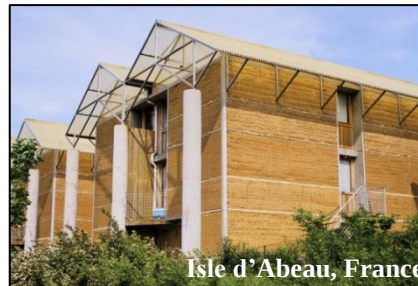
MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

INTRODUCTION

Qualités du matériau terre:



Matériau de construction le plus répandu dans le monde – habitat d'environ un tiers de la population mondiale

Matériau local nécessitant peu de transformations : véritable alternative pour répondre au défis énergétiques et climatiques actuels

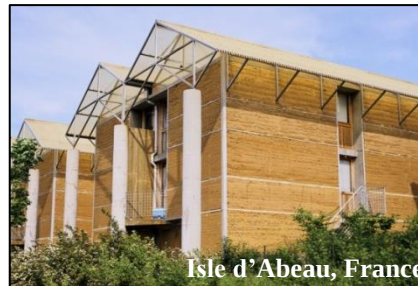
MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

INTRODUCTION

Qualités du matériau terre:



Matériau de construction le plus répandu dans le monde – habitat d'environ un tiers de la population mondiale

Matériau local nécessitant peu de transformations : véritable alternative pour répondre au défis énergétiques et climatiques actuels

Forte inertie thermique et hygrique, offrant plus de confort

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

INTRODUCTION

Enjeux de la recherche :

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

INTRODUCTION

Enjeux de la recherche :

Qualité et confort connus mais pas/peu de caractérisations précises de son comportement hygrothermique

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

INTRODUCTION

Enjeux de la recherche :

Qualité et confort connus mais pas/peu de caractérisations précises de son comportement hygrothermique

Absence de réglementation spécifique au matériau terre

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

INTRODUCTION

Enjeux de la recherche :

Qualité et confort connus mais pas/peu de caractérisations précises de son comportement hygrothermique

Absence de réglementation spécifique au matériau terre

Enjeux liés à la rénovation du bâti ancien

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

INTRODUCTION

Enjeux de la recherche :

Qualité et
son comp

cises de

Absence d

Enjeux liés



Rue Commandant Charcot, Lyon, France
Février 2012

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

INTRODUCTION

Démarche de l'étude :

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

INTRODUCTION

Démarche de l'étude :

Choix d'une approche à l'échelle du milieu homogène, traitant de la cinématique des phases en présence (liquide, gazeuse) à l'intérieur des pores

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

INTRODUCTION

Démarche de l'étude :

Choix d'une approche à l'échelle du milieu homogène, traitant de la cinématique des phases en présence (liquide, gazeuse) à l'intérieur des pores

Meilleure identification des simplifications nécessaires au développement des équations, de manière à ce que le modèle tienne compte des spécificité du matériau terre

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

INTRODUCTION

Démarche de l'étude :

Choix d'une approche à l'échelle du milieu homogène, traitant de la cinématique des phases en présence (liquide, gazeuse) à l'intérieur des pores

Meilleure identification des simplifications nécessaires au développement des équations, de manière à ce que le modèle tienne compte des spécificité du matériau terre

Confrontation expérimentale du modèle puis évaluation numérique de l'influence d'une hypothèse particulière : l'influence de la température sur le flux d'eau liquide

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la vapeur d'eau:

$$\frac{\partial m_v}{\partial t} =$$

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la vapeur d'eau:

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} =$$

Conservation de l'eau liquide:

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} =$$

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

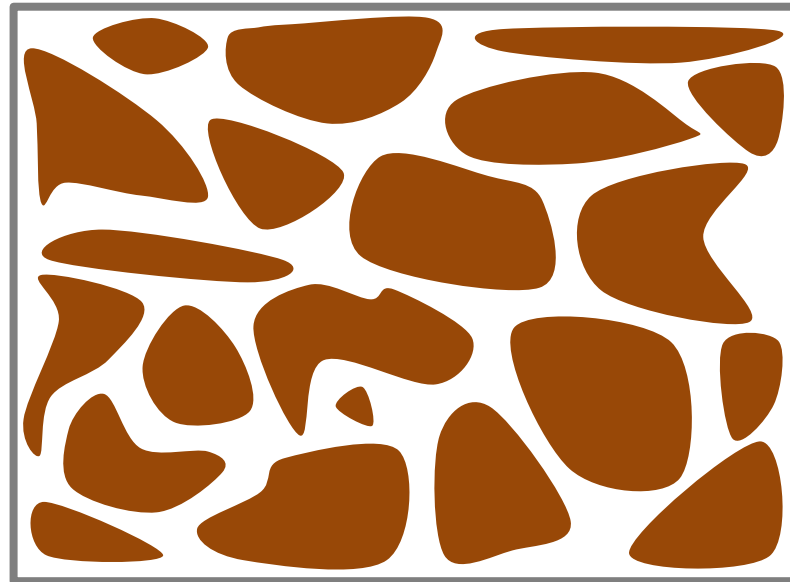
MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la vapeur d'eau:

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} =$$

Conservation de l'eau liquide:

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} =$$



MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

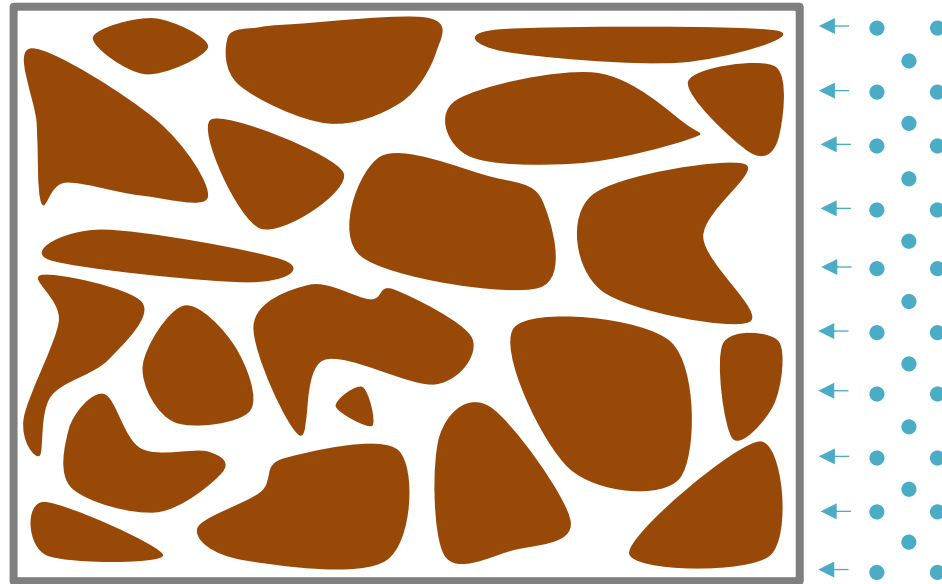
MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la vapeur d'eau:

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} =$$

Conservation de l'eau liquide:

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} =$$



MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

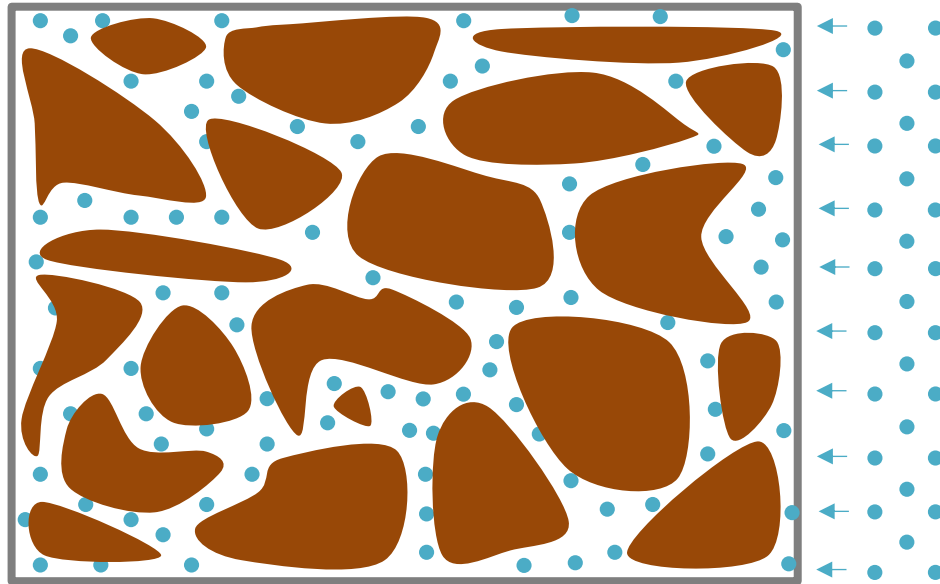
MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la vapeur d'eau:

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot \left(\frac{RT}{M_{H_2O}} D_e^V \underline{\nabla}(p_V) \right)$$

Conservation de l'eau liquide:

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} =$$



MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

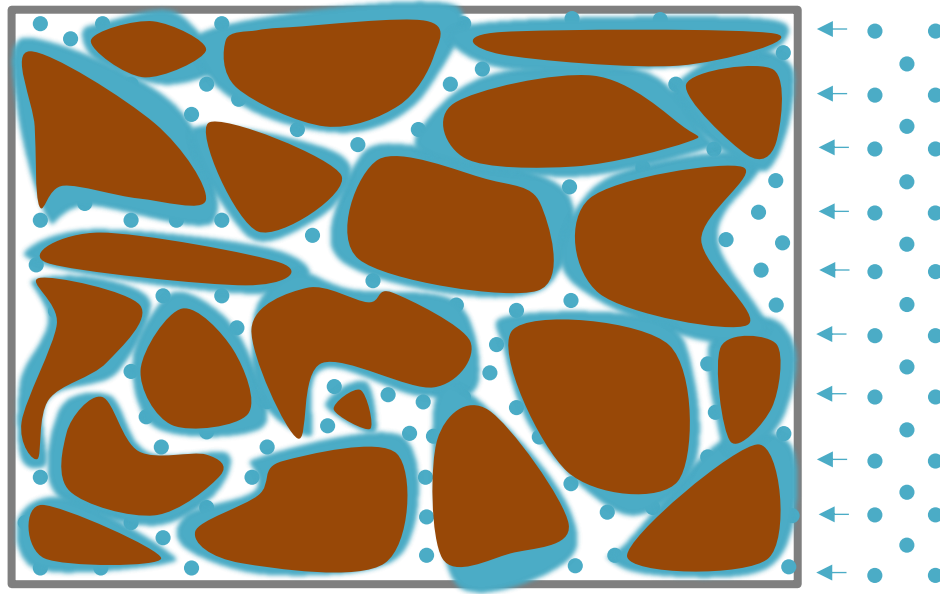
MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la vapeur d'eau:

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot \left(\frac{RT}{M_{H_2O}} D_e^V \underline{\nabla}(p_V) \right) + m_{\rightarrow V}^{\circ}$$

Conservation de l'eau liquide:

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} =$$



MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

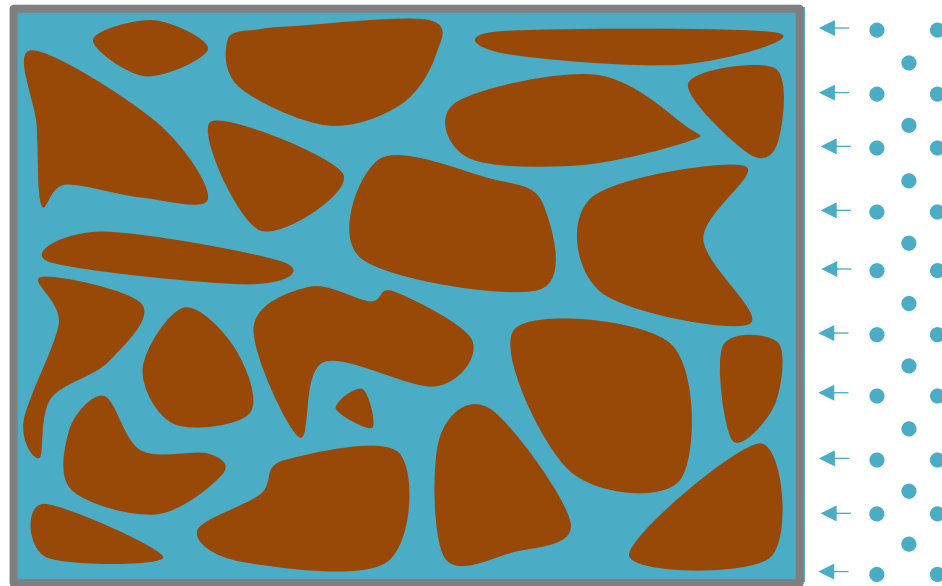
MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la vapeur d'eau:

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot \left(\frac{RT}{M_{H_2O}} D_e^V \underline{\nabla}(p_V) \right) + m_{\rightarrow V}^{\circ}$$

Conservation de l'eau liquide:

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} = \rho_L \underline{\nabla} \cdot \left(\frac{\kappa}{\eta_L} \underline{\nabla} p_L \right)$$



MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

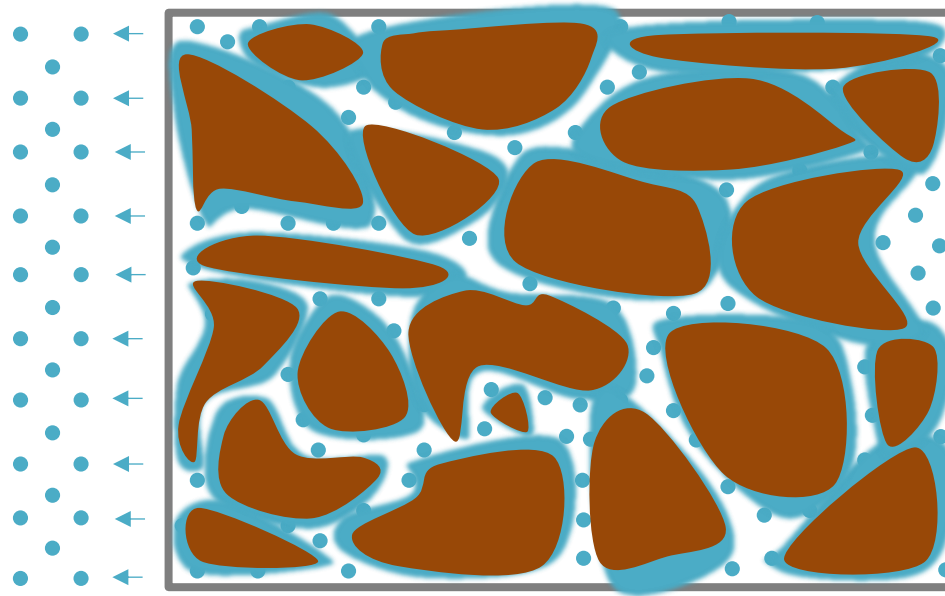
MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la vapeur d'eau:

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot \left(\frac{RT}{M_{H_2O}} D_e^V \underline{\nabla}(p_V) \right) + m_{\rightarrow V}^{\circ}$$

Conservation de l'eau liquide:

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} = \rho_L \underline{\nabla} \cdot \left(\frac{\kappa}{\eta_L} \underline{\nabla} p_L \right) - m_{\rightarrow V}^{\circ}$$



**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la chaleur:

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la chaleur:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} =$$

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la chaleur:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} =$$



vapeur
d'eau



air sec



matrice
solide



eau
liquide

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la chaleur:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\lambda \underline{\nabla} T)$$



vapeur
d'eau



air sec



matrice
solide



eau
liquide

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la chaleur:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$



vapeur
d'eau



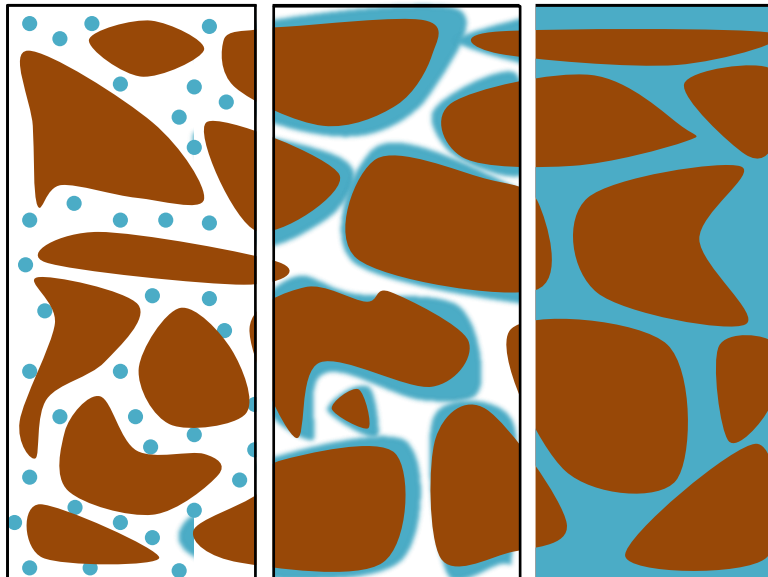
air sec



matrice
solide



eau
liquide



MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la chaleur:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$



vapeur
d'eau



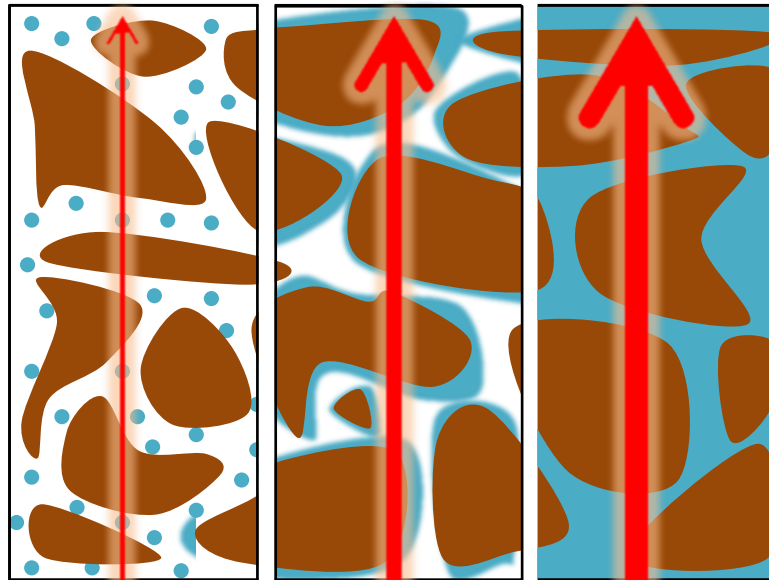
air sec



matrice
solide



eau
liquide



MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la chaleur:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \dot{m}_{\rightarrow v} L(T, \varphi)$$



vapeur
d'eau



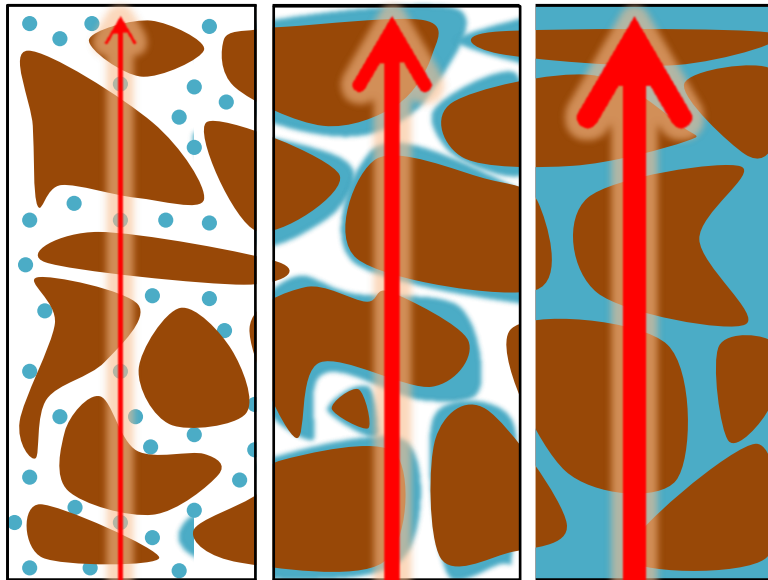
air sec



matrice
solide



eau
liquide



MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Forme du système couplé:

$$\begin{cases} H_T \frac{\partial T}{\partial t} + H_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\mathcal{K}^T \underline{\nabla} T + \mathcal{K}^\varphi \underline{\nabla} \varphi) \\ C_T \frac{\partial T}{\partial t} + C_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\mathcal{L}^T \underline{\nabla} T + \mathcal{L}^\varphi \underline{\nabla} \varphi) \end{cases}$$

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

Dispositif expérimental

Résultats

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE

Maquette de mur en pisé:

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

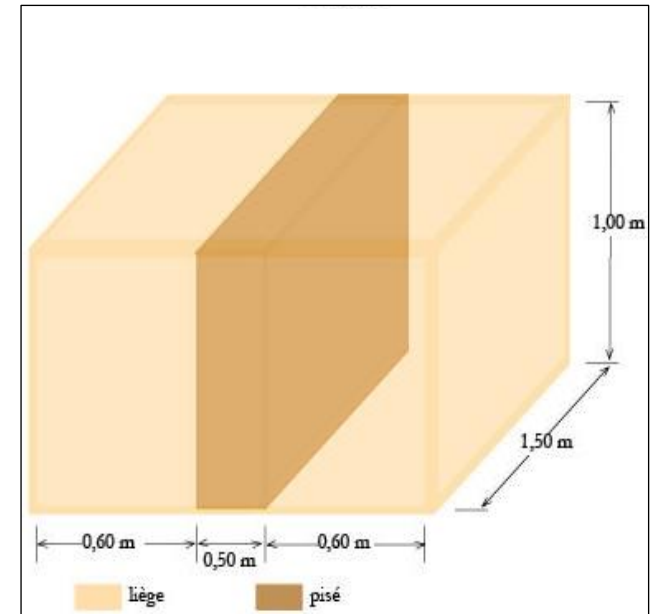
Dispositif expérimental

Résultats

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE

Maquette de mur en pisé:



Mur en pisé de 30 cm d'épaisseur pour une surface $1 \times 1,5 \text{ m}^2$

Capteurs dans le mur (T, HR, TE) à différentes hauteurs et dans l'épaisseur, à la surface du mur (T) et dans les enceintes de part et d'autre (T, HR)

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

Dispositif expérimental

Résultats

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

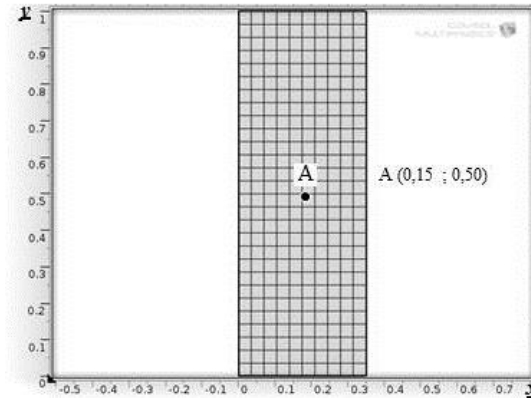
Dispositif expérimental

Résultats

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE

Simulation numérique:



Simulations 2D à l'aide de COMSOL
Multiphysics

Comparaison des valeurs à l'intérieur
du mur, en appliquant aux limites les
valeurs mesurées dans les enceintes
climatiques

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

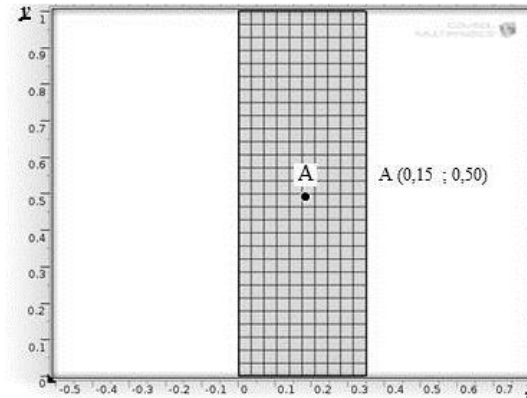
Dispositif expérimental

Résultats

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE

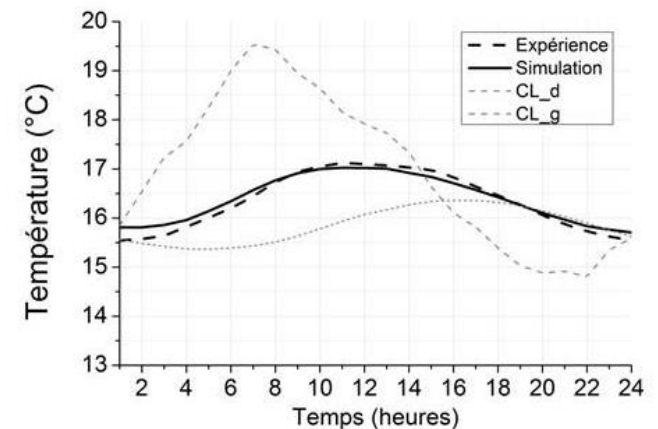
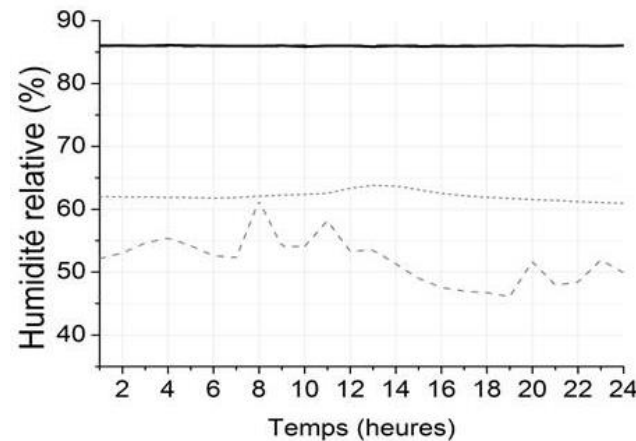
Simulation numérique:



Simulations 2D à l'aide de COMSOL Multiphysics

Comparaison des valeurs à l'intérieur du mur, en appliquant aux limites les valeurs mesurées dans les enceintes climatiques

Comparaison mesures /simulations :



MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

Système couplé
considéré

Sollicitations 1

Sollicitations 2

ÉVALUATION NUMÉRIQUE DE L'IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Équation hygrique :

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

Système couplé
considéré

Sollicitations 1

Sollicitations 2

ÉVALUATION NUMÉRIQUE DE L'IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Équation hygrique :

$$H_T \frac{\partial T}{\partial t} + H_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\mathcal{K}^T \underline{\nabla} T + \mathcal{K}^\varphi \underline{\nabla} \varphi)$$

$$\mathcal{K}^T = \frac{\kappa}{\eta_L} \frac{\rho_L R}{M_{H_2O}} \ln \varphi + D_e^V \frac{\varphi M_{H_2O}}{\rho_L R T} \frac{dp_V^{sat}}{dT}$$

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

Système couplé
considéré

Sollicitations 1

Sollicitations 2

ÉVALUATION NUMÉRIQUE DE L'IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Équation hygrique :

$$H_T \frac{\partial T}{\partial t} + H_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\mathcal{K}^T \underline{\nabla} T + \mathcal{K}^\varphi \underline{\nabla} \varphi)$$

$$\mathcal{K}^T = \frac{\kappa}{\eta_L} \frac{\rho_L R}{M_{H_2O}} \ln \varphi + D_e^V \frac{\varphi M_{H_2O}}{\rho_L R T} \frac{dp_V^{sat}}{dT}$$

loi de Kelvin :

$$p_G - p_L = -\frac{\rho_L R T}{M_{H_2O}} \ln \varphi \quad \rightarrow \quad dp_L = \frac{\rho_L R T}{M_{H_2O}} d \ln \varphi + \frac{\rho_L R \ln \varphi}{M_{H_2O}} dT$$

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

Système couplé
considéré

Sollicitations 1

Sollicitations 2

ÉVALUATION NUMÉRIQUE DE L'IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Équation hygrique :

$$H_T \frac{\partial T}{\partial t} + H_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\mathcal{K}^T \underline{\nabla} T + \mathcal{K}^\varphi \underline{\nabla} \varphi)$$

$$\mathcal{K}^T = \frac{\kappa}{\eta_L} \frac{\rho_L R}{M_{H_2O}} \ln \varphi + D_e^V \frac{\varphi M_{H_2O}}{\rho_L R T} \frac{dp_V^{sat}}{dT}$$

loi de Kelvin :

$$p_G - p_L = -\frac{\rho_L R T}{M_{H_2O}} \ln \varphi \quad \rightarrow \quad dp_L = \frac{\rho_L R T}{M_{H_2O}} d \ln \varphi + \frac{\rho_L R \ln \varphi}{M_{H_2O}} dT$$

➔ Flux d'eau liquide conduit par un gradient d'humidité relative ET de température

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

Système couplé
considéré

Sollicitations 1

Sollicitations 2

ÉVALUATION NUMÉRIQUE DE L'IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Équation hygrique :

$$H_T \frac{\partial T}{\partial t} + H_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\mathcal{K}^T \underline{\nabla} T + \mathcal{K}^\varphi \underline{\nabla} \varphi)$$

$$\mathcal{K}^T = \frac{\kappa}{\eta_L} \frac{\rho_L R}{M_{H_2O}} \ln \varphi + D_e^V \frac{\varphi M_{H_2O}}{\rho_L R T} \frac{dp_V^{sat}}{dT}$$

loi de Kelvin :

$$p_G - p_L = -\frac{\rho_L R T}{M_{H_2O}} \ln \varphi \quad \rightarrow \quad dp_L = \frac{\rho_L R T}{M_{H_2O}} d \ln \varphi + \frac{\rho_L R \ln \varphi}{M_{H_2O}} dT$$

➔ Flux d'eau liquide conduit par un gradient d'humidité relative ET de température

MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

Système couplé
considéré

Sollicitations 1

Sollicitations 2

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Sollicitation LP1:

Température constante de 30°C

Humidité relative en cycles sinusoïdaux journaliers entre 70% et 50%

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Système couplé
considéré

Sollicitations 1

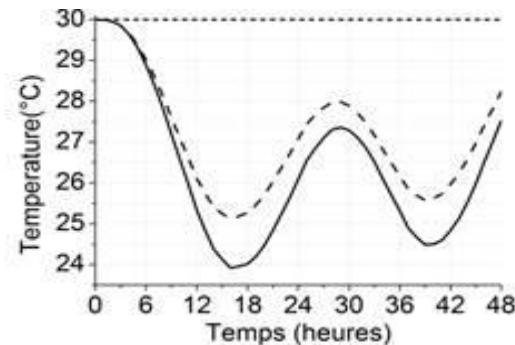
Sollicitations 2

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

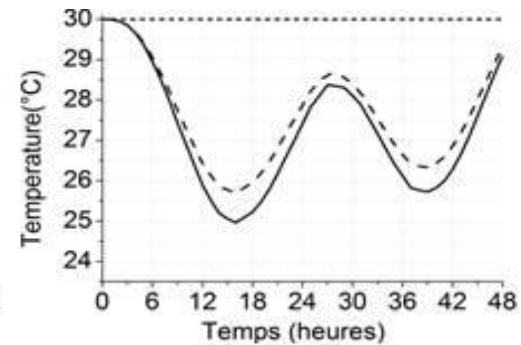
Sollicitation LP1:

Température constante de 30°C

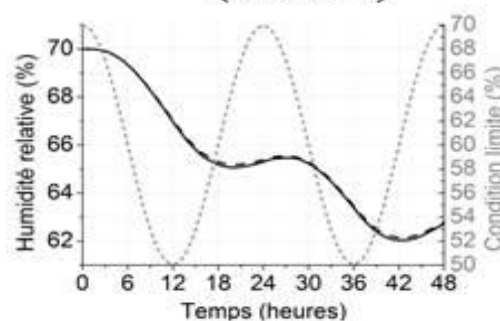
Humidité relative en cycles sinusoïdaux journaliers entre 70% et 50%



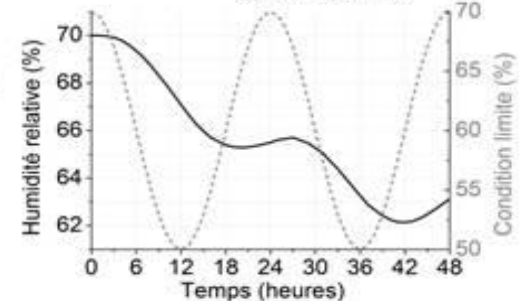
(LP1 a. 1)



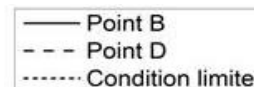
(LP1 b.1)



(LP1 a.2)



(LP1 b.2)



MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

Système couplé
considéré

Sollicitations 1

Sollicitations 2

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Sollicitation LP2:

Température en cycles sinusoïdaux journaliers entre 0 et 20 °C

Humidité relative constante de 50%

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Système couplé
considéré

Sollicitations 1

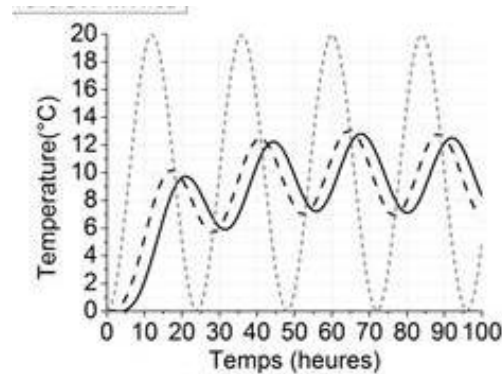
Sollicitations 2

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

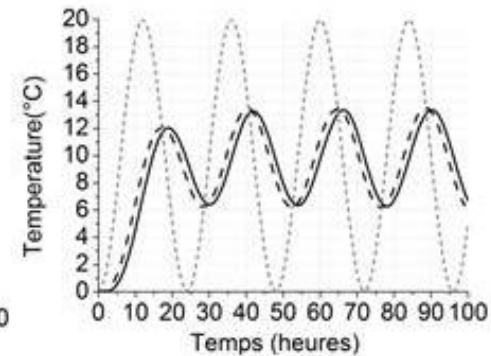
Sollicitation LP2:

Température en cycles sinusoïdaux journaliers entre 0 et 20 °C

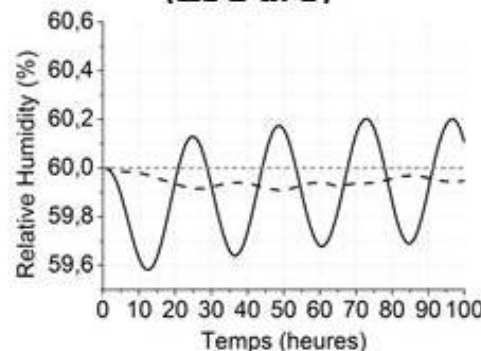
Humidité relative constante de 50%



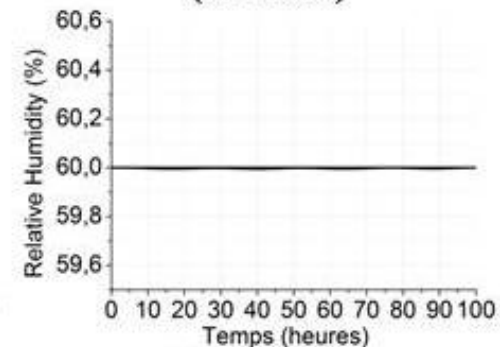
(LP2 a.1)



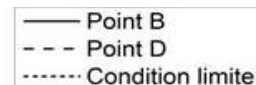
(LP2 b.1)



(LP2 a.2)



(LP2 b.2)



**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

CONCLUSION

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

CONCLUSION

Ce premier point souligne les différences non négligeables entre la prise en compte ou non d'une certaine hypothèse.

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

CONCLUSION

Ce premier point souligne les différences non négligeables entre la prise en compte ou non d'une certaine hypothèse.

Une étude plus complète (à paraître) réitère la même démarche pour d'autres hypothèses pour aboutir à un modèle le plus adapté au matériau terre.

**MISE EN PLACE
DU MODÈLE
HYGROTHERMIQUE**

**VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE**

**IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE**

CONCLUSION

Ce premier point souligne les différences non négligeables entre la prise en compte ou non d'une certaine hypothèse.

Une étude plus complète (à paraître) réitère la même démarche pour d'autres hypothèses pour aboutir à un modèle le plus adapté au matériau terre.

MERCI DE VOTRE ATTENTION !

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

ANNEXES

Conservation de la masse de vapeur d'eau:

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot \left(\frac{RT}{M_{H_2O}} D_e^V \underline{\nabla} (p_V) \right) + \dot{m}_{\rightarrow V}$$

D_e^V : coefficient de diffusion effectif

$\dot{m}_{\rightarrow V}$: taux massique de production de vapeur dû aux processus d'évaporation/condensation

Conservation de la masse d'eau liquide:

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} = \rho_L \underline{\nabla} \cdot \left(\frac{\kappa}{\eta_L} \underline{\nabla} p_L \right) - \dot{m}_{\rightarrow V}$$

κ : perméabilité totale au liquide

η_L : viscosité dynamique de l'eau

ANNEXES

Conservation de la masse TOTALE d'eau:

Loi de Kelvin :

$$p_G - p_L = -\frac{\rho_L RT}{M_{H_2O}} \ln \varphi \rightarrow dp_L = \frac{\rho_L RT}{M_{H_2O}} d \ln \varphi + \frac{\rho_L R \ln \varphi}{M_{H_2O}} dT$$

Équation globale :

$$\frac{1}{\rho_L} \left(\rho_d \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \phi_G \frac{M_{H_2O} p_v^{sat}(T)}{RT} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\phi_G \rho_V^\alpha}{\rho_L} \frac{\partial T}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\mathcal{K}^T \underline{\nabla} T + \mathcal{K}^\varphi \underline{\nabla} \varphi)$$

$$\mathcal{K}^T = \frac{\kappa}{\eta_L} \frac{\rho_L R}{M_{H_2O}} \ln \varphi + D_e^V \frac{\varphi M_{H_2O}}{\rho_L RT} \frac{dp_v^{sat}}{dT}$$

$$\mathcal{K}^\varphi = \frac{\kappa}{\eta_L} \frac{\rho_L RT}{M_{H_2O} \varphi} + D_e^V \frac{M_{H_2O}}{\rho_L RT} p_v^{sat}$$

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

ANNEXES

Équation de la chaleur:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\lambda \underline{\nabla} T) - \dot{m}_{\rightarrow V} L(T, \varphi)$$

Capacité thermique moyenne :

$$\rho C_p = (1 - \phi) \rho_S C_{p,S} + \phi S_r \rho_L C_{p,L} + \phi (1 - S_r) (\rho_A C_{p,A} + \rho_V C_{p,V})$$

ϕ : porosité totale

S_r : saturation

Chaleur latente associée au changement de phase liquide/vapeur:

$$L(T, \varphi) = L_0 + (C_{p,V} - C_{p,L})(T - T_{ref}) + (\alpha_L T - 1) \frac{RT}{M_{H_2O}} \ln \varphi$$

α : dilatation volumique de l'eau

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION
EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE
L'HYPOTHÈSE

ANNEXES

Équation de la chaleur finale:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \left(L(T, \varphi) \rho_d \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\mathcal{L}^T \underline{\nabla} T + \mathcal{L}^\varphi \underline{\nabla} \varphi)$$

$$\mathcal{L}^T = \lambda - L(T, \varphi) \rho_L \frac{\kappa}{\eta_L} \frac{R}{M_{H_2O}} \ln \varphi$$

$$\mathcal{L}^\varphi = -L(T, \varphi) \rho_L \frac{\kappa}{\eta_L} \frac{RT}{M_{H_2O} \varphi}$$

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la masse de vapeur d'eau:

L'évolution de la quantité de vapeur d'eau dépend de:

- la diffusion de la vapeur selon la loi de Fick
- la disparition / création de vapeur par condensation / évaporation

Conservation de la masse d'eau liquide:

L'évolution de la quantité de liquide dépend de :

- l'écoulement d'eau liquide selon la loi de Darcy
- la disparition / création de liquide par évaporation / condensation

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de l'eau

Équation de la chaleur

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Conservation de la chaleur:

Le stockage de chaleur (capacité thermique) tient compte de tous les éléments présents : squelette solide, phase liquide, phase gazeuse (air sec + vapeur d'eau)

Le transfert de chaleur a lieu par conduction, suivant la loi de Fourier

La création / consommation de chaleur peut-être due au changement d'état