

# Approche expérimentale et numérique multi-échelle dans la caractérisation des transferts thermo hydriques de la terre crue

Dalel MEDJELEKH<sup>1,2</sup>, Laurent ULMET<sup>1</sup>, Frédéric DUBOIS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Limoges, Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes, 19300 Egletons, France, mail : [dalel.medjelekh@etu.unilim.fr](mailto:dalel.medjelekh@etu.unilim.fr)

<sup>2</sup>Université Mentouri, de Constantine, Laboratoire d'Architecture Bioclimatique et d'Environnement ABE, 25000 Constantine, Algérie

<sup>1</sup>Université de Limoges, Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes, 19300 Egletons, France, mail : [laurent.ulmet@unilim.fr](mailto:laurent.ulmet@unilim.fr)

<sup>1</sup>Université de Limoges, Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes, 19300 Egletons, France, mail : [frederic.dubois@unilim.fr](mailto:frederic.dubois@unilim.fr)

**RÉSUMÉ.** Face à la problématique énergétique du bâtiment et l'impact environnemental lié, il apparaît que les enveloppes en terre crue sont une piste prometteuse en termes d'amélioration du confort thermique, de qualité de l'air intérieur, de consommation énergétique et de régulation de l'humidité ambiante. Une caractérisation des transferts hygrothermiques dans la terre crue a donc été menée avec une approche expérimentale et numérique multi-échelle. Ainsi, le monitoring d'une maison habitée sous climat chaud/hyper aride, construite en terre et paille a été sujet de caractérisation au premier niveau, montrant l'effet de la régulation thermo hydrique de ce matériau. Des études aux échelles du matériau et de la paroi ont été nécessaires pour vérifier ce comportement. Celle du matériau a permis de caractériser les propriétés liées aux transferts de chaleur et de masse. Le couplage thermo-hydrique a fait l'objet d'une étude spécifique à l'échelle de la paroi en terre, caractérisée via une enceinte bi-climatique. Les implémentations différences finies et éléments finis ont abouti à une analyse fine des transferts à l'échelle de la paroi en terre crue. L'accent est mis sur les effets de l'humidité apportés dans les ambiances intérieures afin de valider un outil numérique développé dans ce travail.

**ABSTRACT.** In front of the building energy issues and environmental impact bound, it appears that the earth envelopes are a promising track in terms of improving thermal comfort, indoor air quality, energy consumption and indoor humidity regulation. For this purpose, a characterization of hygrothermal transfers in the unfired earth has been conducted with a multiscale experimental and numerical approach. Thus, the monitoring of one inhabited house, built in earth/straw under hot/hyperarid climate was the characterization subject at the first level, showing the hygrothermal regulation effect of this material. The studies at the material and wall scales was necessary to check this behavior. That of the material has been used to characterize properties related to heat and mass transfers. The hygrothermal coupling has been the focus of a specific study via a dual-climate test chamber at an earth wall scale. Finite differences FD and finite elements FE implementations have resulted in a detailed analysis of transfers across tested earth wall. Emphasis is placed on the effects of moisture brought in indoor environments in order to validate a digital tool developed in this work.

**MOTS-CLÉS:** caractérisation multi-échelle, terre crue, transferts thermo-hydriques, expérimentations, simulations numériques.  
**KEY WORDS:** Multiscale characterization, unfired earth, heat and mass transfers, experimentations, numerical simulations.

## 1. Introduction

Plusieurs études et suivis expérimentaux sous divers climats (d'Europe du Nord, méditerranéens ou africains) ont démontré que les constructions en terre crue ont un fort potentiel de régulation hydrique et d'amortissement des fluctuations de l'humidité relative dans les bâtiments [PAD 99], [ALL 10], [MED 13]. De plus, le processus de couplage entre transfert de chaleur et de masse modifie l'inertie thermique et la consommation d'énergie en termes de chauffage et de climatisation [MED 13], [LUI 13] améliorant ainsi le confort thermique [MED 13]. D'autre part, le profil environnemental des briques d'argile crue a été jugé excellent par rapport au béton [COL 06] ou à la brique cuite, et ce au regard du processus de production (énergie grise et transport) [OTI 09], [MOR 01]. A cet effet, une caractérisation des transferts thermo hydriques dans la terre crue a été menée avec une approche expérimentale et numérique multi-échelle. Ainsi, le monitoring d'une maison habitée sous un climat chaud/hyper aride, construite en terre et paille a été sujet de caractérisation au niveau de la première échelle. Un modèle de transfert de chaleur et de masse couplé est ensuite développé à partir d'un modèle mathématique à l'échelle de la paroi et de l'enveloppe, selon deux approches différences finies (DF) sous VBA et éléments finis (EF) sous Cast3M.

Cependant, l'expérimentation à l'échelle du matériau a permis de caractériser les propriétés liées au transfert de chaleur et de masse alimentant, à terme, les modèles établis. Enfin, le couplage thermo-hydrique a fait l'objet d'une étude spécifique à l'échelle de la paroi en terre, caractérisée via une enceinte bi-climatique. Les implémentations DF/EF ont abouti à une analyse fine des transferts à l'échelle de la paroi avec un travail de réduction d'ordre nécessaire pour limiter les temps de calcul. L'accent est mis sur les effets de l'humidité apportés dans les ambiances intérieures afin de valider un outil numérique développé dans ce travail.

## 2. Matériel et méthode

### 2.1. Première échelle : la maison habitée

Une maison introvertie, construite en terre et paille sous le climat chaud et hyper aride de Barika en Algérie a été choisie pour le monitoring de 15 mois, Figures 1-2. Les mesures de température et d'humidité relative ont été prises toutes les quinze minutes avec des capteurs LogTag dans le salon (S-E) et la chambre 2 (N-O). Pour les prélèvements externes, un troisième capteur a été placé, sous protection, sur la façade S-E.

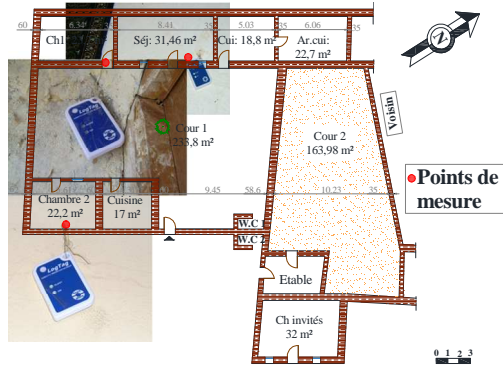


Figure 1. Plan de la maison et points de mesure

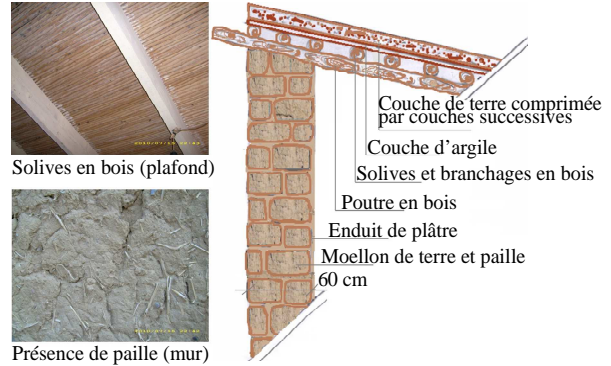


Figure 2. Détails de toiture et paroi externe

### 2.2. Deuxième échelle : le matériau

Au niveau de l'échelle du matériau, trois demi briques de terre crue de dimensions:  $L \times l \times H = 107 \times 57 \times 107$  mm ont suivi une caractérisation thermique et hydrique dissociée.

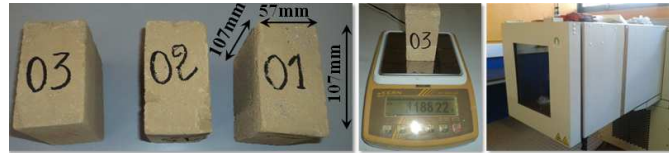


Figure 3. Echantillons de brique terre crue testés

#### 2.2.1. Isotherme de sorption

La construction des isothermes de sorption repose sur l'identification du taux d'humidité d'équilibre pour chaque palier d'humidité relative durant les phases d'adsorption et de désorption. Afin d'obtenir des isothermes de sorption complète, utilisant la méthode gravimétrique, un suivi dans une enceinte climatique par pesée régulière des échantillons a été effectué. Le chemin hydrique suivant a été adopté:

- L'échantillonnage est d'abord conditionné dans l'ambiance du laboratoire ( $\pm 20^\circ\text{C}$ ,  $\pm 50\%$  HR),
- Une phase d'adsorption à 95% HR et à température constante à  $20^\circ\text{C}$  ;
- Deux paliers de désorption à 65% HR et 50% HR à  $20^\circ\text{C}$  de température constante ;
- Passage des échantillons à l'étuve, à  $103^\circ\text{C}$  pour un séchage optimal et mesure de la masse sèche  $M_s$  ;
- Suivi des échantillons durant trois paliers d'adsorption à 50% HR, 65% HR et 80% HR à  $20^\circ\text{C}$ .

L'évolution de la teneur en eau moyenne  $\bar{w}$  est déduite de l'évolution de la masse humide  $M_h$  selon l'expression suivante :

$$\bar{w} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad [1]$$

### 2.2.2. Caractérisation des propriétés de transfert de chaleur (conductivité, capacité thermique, densité)

A chaque stabilisation du palier en HR durant l'établissement des isothermes de sorption, des mesures de la conductivité thermique  $\lambda$  des briques de terre ont été menées employant la méthode du disque chaud, Figure 4. Cette technique, basée sur le principe des sources planes transitoires (TPS – Transient Plane Source), donne directement accès à la conductivité thermique [GUS 91]. Une fine sonde, de taille 6 mm est placée entre deux blocs du matériau terre à mesurer. La sonde est constituée d'un fil de nickel enroulé en forme d'une double-spirale et inséré dans un film en Kapton. La sonde joue à la fois un rôle de source surfacique de chaleur (par effet joule) et de capteur mesurant l'élévation de température, via la mesure de la résistance électrique du fil.

La mesure de la capacité thermique anhydre  $C_p$  des briques de terre a été aussi menée via le calorimètre C80 Calvet (de Setaram), de type différentiel. Des échantillons de la brique ont été broyés, puis mises à l'étuve pendant 24h, à une température de 110°C. A la sortie de l'étuve, l'échantillon est pesé avec une balance électronique de haute précision. La cellule de l'échantillon est ensuite introduite dans le calorimètre à l'aide d'une tige, pour traitement des données ultérieurement, Figure 5.

Quant à la masse volumique  $\rho_s$  sèche des briques de terre, elle a été déduite de la masse anhydre des échantillons testés, pesés après la mise à l'étuve. Notant que les valeurs correspondant au matériau humide (indice  $h$ ) peuvent s'obtenir aisément par la loi des mélanges, avec deux composants qui sont le matériau sec (indice  $s$ ) et l'eau (indice  $e$ ) :

$$\rho_h = \rho_s (1+w) \quad [2]$$

$$C_h = \frac{C_s + wC_e}{1+w} \quad [3]$$

Avec  $\rho_h$  : la masse volumique humide ;  $w$  : la teneur en eau ;  $C_e$  : la capacité thermique de l'eau ( $C_e = 4180$  J/kg.K) ;  $C_s$  (ou  $C_p$ ) : la capacité thermique sèche ;  $C_h$  : la capacité thermique humide.



Figure 4. Mesure de la conductivité thermique



Figure 5. Mesure de la capacité thermique sèche

### 2.3. Troisième échelle : la paroi

Cette échelle représente ainsi la dimension intermédiaire entre l'échelle du matériau et l'échelle de l'enveloppe. De plus, les dimensions réelles vis-à-vis du transfert de masse et de chaleur doivent permettre de caractériser, d'une part, les propriétés de diffusion mais également ses interactions avec le transfert de chaleur. Une paroi de 2m50 de côté et de 10 cm d'épaisseur, composée d'une maçonnerie de terre crue contreventée par une ossature bois est testée en réponse de sollicitations thermo-hydriques dynamiques avec l'utilisation d'une double enceinte climatique, Figure 6.

Lors de sa construction, le mur a été appareillé dans deux parties, gauche et centrale, par 5 thermo-hygromètres capacitifs chacune. Ces derniers ont été intégrés dans les briques à différentes profondeurs afin de mesurer les profils thermique et hydrique durant les différents essais. Espacés de 10 mm dans l'épaisseur et décalés spatialement, les capteurs ont été disposés à mi-hauteur de la paroi dans des cavités prévues à cet effet, Figure 7. L'instrumentation est complétée par des sondes de température de surface. Egalement les mesures de température et l'humidité relative des deux enceintes sont récoltées par le système informatique de régulation.

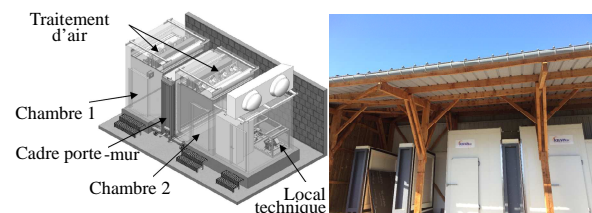


Figure 6. Vue de la double enceinte climatique

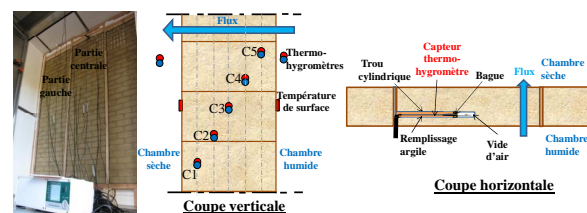
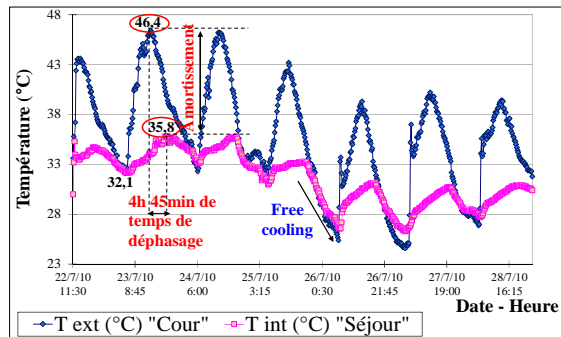


Figure 7. Monitoring et points de mesure de la paroi

### 3. Résultats et discussion

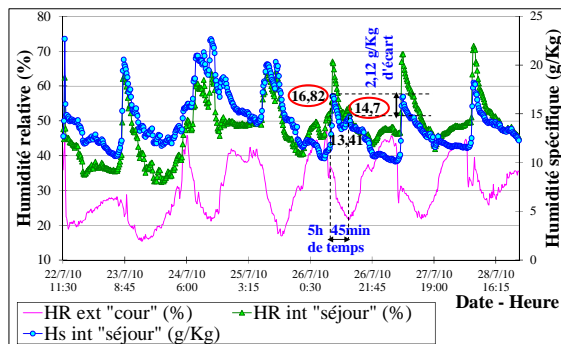
#### 3.1. Monitoring de la maison habitée

La température ambiante du séjour offre une stabilité avec une amplitude moyenne journalière de 3.8 K. Elle chute en fin de journée et suit la température externe du fait du free-cooling nocturne. Un amortissement de 10,6 K a été enregistré après 4h 45 min entre le pic de température extérieure (46,4°C au niveau de la cour) et celui de la température intérieure (35,8 °C, Figure 8). Les phénomènes de déphasage/amortissement sont bien évidemment dus à la forte inertie thermique. L'amortissement est causé par l'effet isolant du composant terre/paille. C'est un matériau poreux et hygroscopique qui combine, à la fois, une macroporosité due à l'arrangement imparfait des particules de terre, et une microporosité des fibres végétales de la paille [MED 15]. Le déphasage est surtout dû à l'effet de l'épaisseur importante des murs, 60 cm et de la toiture, 45 cm.



**Figure 8.** Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de séjour, semaine de canicule

En comportement hydrique estival, l'humidité relative dans le séjour est nettement supérieure à celle de l'extérieur, Figure 9, puisque la terre régule bien les conditions intérieures. L'étude des propriétés hygrothermiques des briques de terre a confirmé leur capacité à réguler l'humidité interne [CAG 14]. D'autre part, pour des raisons de rafraîchissement, les usagers affirment qu'ils versent 4 seaux d'eau de 20 litres et qu'ils laissent pendant une heure ou plus pour assécher le sol après. De petites répliques succèdent à chaque fois les pics dans l'humidité spécifique intérieure (16,82 g/kg). En effet, les tâches ménagères effectuées entre 9h et 11h sont suivies d'une période de ventilation qui fait chuter l'humidité spécifique interne (13,41 g/kg). Juste après la fermeture des fenêtres, un autre pic (14,7 g/kg) est atteint, causé par une restitution de l'eau adsorbée dans les matériaux hygroscopiques de l'enveloppe. Cette quantité d'eau diffusée, même faible, améliore la sensation du confort thermique chez les occupants. Ces constatations restent à vérifier au niveau d'autres échelles inférieures, notamment l'échelle du matériau et celle de la paroi.



**Figure 9 :** Variation horaire de l'humidité relative spécifique cas de séjour, période estivale

#### 3.2. Outils de modélisation

Un modèle mathématique a été développé selon deux approches EF sous Cast3M et DF sous VBA/Excel en modèles de paroi et de zone. La confrontation des résultats des deux modes d'implantation a simplement permis de garantir l'absence d'erreurs de programmation. Ces deux modèles sont alimentés par les propriétés thermo hydriques des matériaux et les conditions limites du climat réel. Il est rappelé que trois types de transfert peuvent coexister, qui sont la chaleur sensible dans le transfert thermique [4], l'eau liquide [5] et la vapeur d'eau [6] dans le bilan hydrique :

$$\varphi_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [4]$$

$$\varphi_{wl} = -\rho_s D_w \frac{\partial w}{\partial x} = -\rho_s D_w \frac{\partial w}{\partial Hr} \frac{\partial Hr}{\partial x} \quad [5]$$

$$\varphi_{wv} = -\delta \frac{\partial p_v}{\partial x} = -\delta \frac{\partial (Hr p_{vs})}{\partial x} \quad [6]$$

Deux équations du bilan thermique et hydrique expriment le transfert couplé. En supposant qu'on est dans le domaine hygroscopique, l'eau liquide est négligée. Une hypothèse forte consiste à supposer qu'en tout point du matériau, l'équilibre hygroscopique est atteint, c'est-à-dire que la teneur en eau du matériau correspond à l'humidité relative de l'air humide dans le réseau des vides, conformément aux courbes isothermes de sorption. Les potentiels de conduite sont T(K) et Hr ( $0 \leq Hr \leq 1$ ). La première équation [7] exprime le bilan de conduction thermique (avec  $(\rho C)$ : la chaleur volumique en  $J/m^3.K$  et  $\lambda$  la conductivité thermique en  $w/mk$ ) auquel s'ajoute le terme de source thermique  $Q_t$  qui est dû à la chaleur de sorption ( $H_s = 2500$  kJ/kg).

$$(\rho C) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} (\lambda \cdot \bar{\nabla} T) + Q_t \quad [7]$$

Avec :  $Q_t = H_s \cdot \bar{\nabla} (\delta \cdot \bar{\nabla} (Hr \cdot p_{vs}))$  où  $p_{vs}$  est la pression de vapeur saturante en Pa et  $\delta$  la perméabilité à la vapeur en  $kg/s.m.Pa$ .

La deuxième équation [8] exprime le bilan de diffusion hydrique :

$$\rho_s \left( \frac{\partial w}{\partial Hr} \right) \cdot \frac{\partial Hr}{\partial t} = \bar{\nabla} (\delta \cdot p_{vs} \cdot \bar{\nabla} Hr) + \bar{\nabla} (\delta \cdot Hr \cdot \bar{\nabla} p_{vs}) \quad [8]$$

### 3.3. Caractérisation à l'échelle du matériau

#### 3.3.1. Isotherme de sorption

Un modèle [MER 09] basé sur la thermodynamique de l'équilibre de phase de l'eau liée avec sa pression de vapeur saturante est utilisé. Sa relation [9] donne la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'humidité relative (avec  $w_s$  l'humidité d'équilibre à 100 % HR,  $\varphi$  et  $a$  paramètres de calage de la courbure des isothermes) :

$$w = w_s \exp(\varphi \ln(Hr) \exp(aHr)) \quad [9]$$

L'isotherme obtenue des briques de terre a une boucle d'hystérésis modérément marquée et légèrement ouverte, selon le degré d'hygroscopicité de la terre. Les isothermes théoriques correspondent bien avec les points expérimentaux suite à l'identification des paramètres du modèle utilisé, Figure 10.

De la dérivée de l'isotherme, la capacité hydrique a également été calculée, Figure 11.

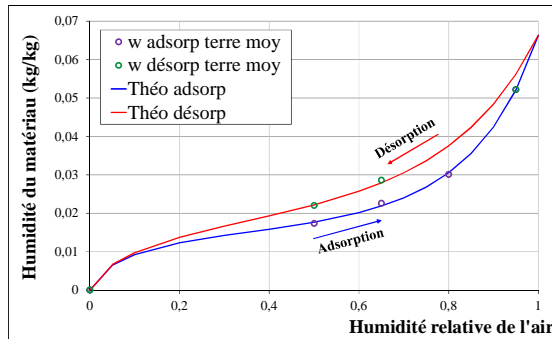


Figure 10. Isotherme de sorption de la brique de terre

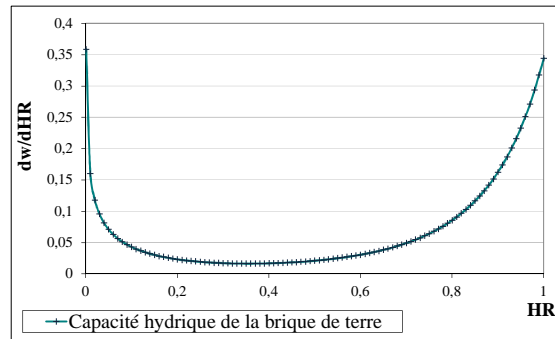


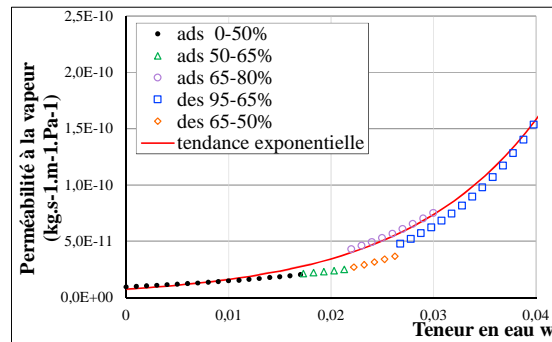
Figure 11. Capacité hydrique de la brique de terre

#### 3.3.2. Propriétés de diffusion

Pour identifier les propriétés de diffusion en exploitant la cinétique de sorption, les courbes expérimentales de variation de teneur en eau sont intégrées dans une procédure de minimisation des écarts entre mesures et calcul par EF. La perméabilité à la vapeur  $\delta$  est supposée dépendante de l'humidité (loi de Fick non linéaire), donnée en fonction de la perméabilité anhydre  $\delta_0$  et du paramètre  $k$  de non linéarité :

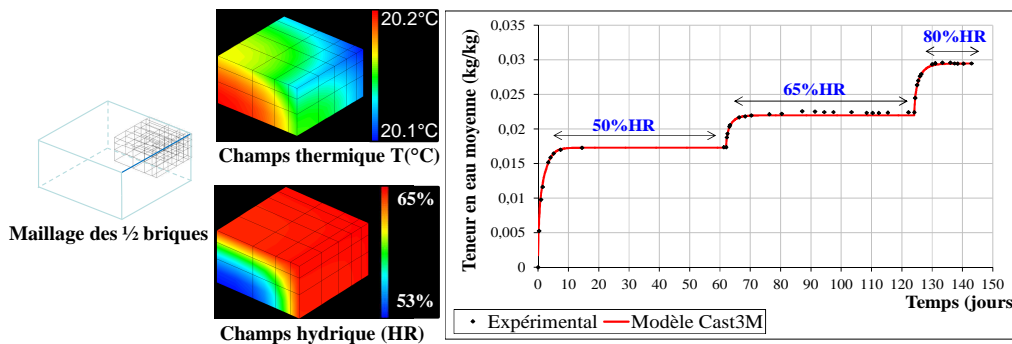
$$\delta(w) = \delta_0 \cdot \exp(k \cdot w) \quad [10]$$

Les valeurs identifiées pour les briques de terre crue sont  $\delta_0 = 7.48 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$  et  $k = 76,3$ . Cette méthode inverse d'identification est riche en informations. Elle permet d'obtenir une loi continue de variation de la perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau Figure 12.



**Figure 12.** Perméabilité à la vapeur de la terre crue en fonction de la teneur en eau (paliers moyens sur les 3 échantillons)

Un bon comportement de caractérisation des propriétés de diffusion est montré sur l'exemple de paliers d'adsorption, après identification de la perméabilité, Figure 13.



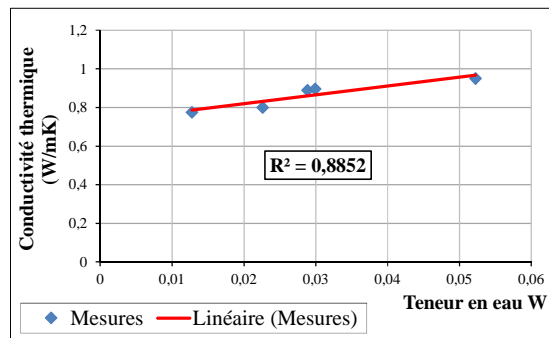
**Figure 13.** Maillage du 1/8 des demi-briques, champs thermique et hydrique modélisés lors du palier d'adsorption 65%HR, et comparaison des cinétiques calculées et mesurées après identification de  $\delta$

### 3.3.3. Propriétés de transfert de chaleur

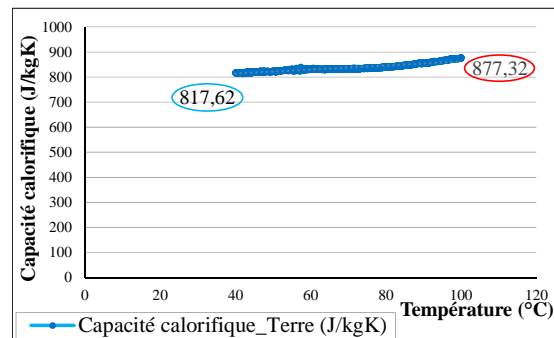
La conductivité thermique de la brique de terre, mesurée par le disque chaud, varie entre 0,77 et 0,95 W/mK, Figure 15, et de façon linéaire :

$$\lambda = 0,674 + 6,1267 \times w \quad [11]$$

Les mesures de la masse volumique sèche donnent des valeurs entre 1761,87 et 1797,59 kg/m<sup>3</sup> avec une valeur moyenne de 1778,88 kg/m<sup>3</sup>. Quant à la capacité calorifique sèche de la brique de terre mesurée par le calorimètre varie entre 817,62 (à 40°C) à 877,32 J/kgK (à 100°C), Figure 16. A noter que le disque chaud permet également de mesurer la capacité thermique volumique mais avec une erreur plus importante que pour la conductivité. La capacité thermique massique est mesurée et si besoin, pour des valeurs sur des matériaux humides, la contribution de l'eau est ajoutée par une loi des mélanges utilisant les fractions massiques.



**Figure 14.** Variation de  $\lambda$  en fonction de % w



**Figure 15.** Capacité thermique sèche

Le tableau 1 ci-dessous résume les propriétés thermiques mesurées des briques de terre crue testées.

**Tableau 1.** Propriétés thermiques des briques de terre crue

$\lambda$ (W/mk)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kg K)
0.77 - 0.95	1761.9 - 1797.6	796 (à 20°C)

### 3.4. Caractérisation à l'échelle de la paroi

La modélisation de l'expérimentation réalisée sur la paroi testée via l'enceinte bi-climatique est basée sur une simulation EF sous Cast3M. Pour limiter le temps de calcul induit, la discrétisation spatiale, tout étant tridimensionnelle, est consacrée à une bande de mur, de 10 mm<sup>2</sup> de surface. En termes de conditions aux limites, les températures et humidités relatives respectives des deux chambres sont imposées via les échanges convectifs thermiques et hydriques. Le long des quatre autres faces (dans l'épaisseur de la paroi), les flux thermiques et hydriques sortants sont nuls.

L'implémentation des équations de transfert de chaleur et de masse est effectuée dans Cast3M en adaptant la procédure TRANSLIN développée pour le transfert de chaleur non linéaire permettant de résoudre, de façon incrémentale, l'équation aux dérivées partielles :

$$a(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} (b(T) \cdot \vec{\nabla} T) + Q \quad [12]$$

Ainsi, cet algorithme incrémental est employé pour résoudre l'équation de transfert de chaleur ci-dessous :

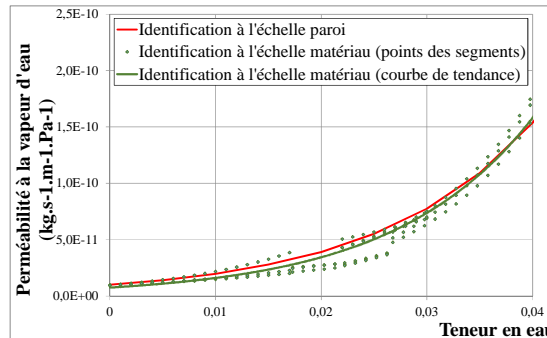
$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + H_s \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \cdot \frac{\partial (H_v \cdot P_{vs})}{\partial x} \right) \quad [13]$$

L'équation de transfert de masse s'écrit :

$$\rho_s \cdot \frac{\partial \omega}{\partial Hr} \cdot \frac{\partial Hr}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \cdot \frac{\partial (Hr \cdot P_{vs})}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \cdot Hr \cdot \frac{\partial P_{vs}}{\partial x} \right) \quad [14]$$

Egalement, pour optimiser les paramètres matériaux introduits dans le modèle, un algorithme d'identification de type simplexe a permis de minimiser l'écart entre les évolutions expérimentales et numériques sur l'ensemble des capteurs.

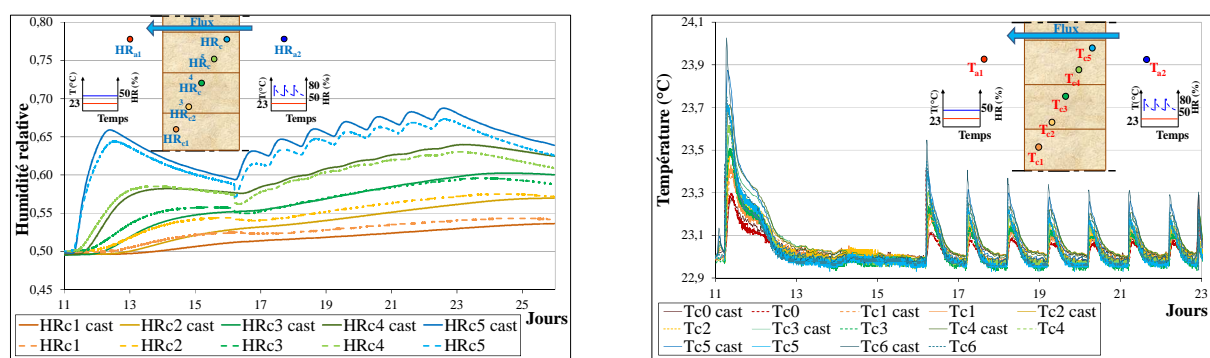
Les paramètres identifiés de la perméabilité à l'échelle de la paroi ( $\delta_0$ :  $9.9563 \times 10^{-12}$  kg/(m<sup>2</sup>.s.Pa) et  $k$ : 68.4) donnent des courbes quasi identiques à celles de l'échelle matériau, Figure 16. L'approche est donc peu sensible aux effets d'échelle, ni au choix des grandeurs physiques sur lesquelles porte l'identification : teneur en eau moyenne à l'échelle matériau ou profil d'humidité relative à l'échelle paroi.



**Figure 16.** Perméabilité à l'échelle matériau et paroi (simplexe)

La simulation présentée ci-après concerne la sollicitation par créneaux multiples d'humidité relative imposée dans la chambre humide à 23°C, alors que la chambre sèche est maintenue à 50% HR et 23 °C. Le premier créneau à 90% HR d'une demi-heure, est suivi d'un régime libre durant 6 jours. Les derniers sauts sont successifs à 80% HR avec un palier de 30 minutes, qui sont également suivis d'une interruption de la régulation hydrique (régime libre).

La réponse hydrique est accentuée en fonction de l'emplacement du capteur dans la paroi en terre par rapport à la chambre humide, Figure 17. L'amortissement de l'humidité est mis en avant selon la profondeur de pénétration de l'humidité dans la paroi. La simulation donne un bon comportement avec des écarts inférieurs à 3% HR aux mesures expérimentales. Les profils de température montrent l'effet thermique des transferts hydriques, via la chaleur de sorption, avec une élévation brutale de la température de 0.6 °C, Figure 17.



**Figure 17.** Profils hydriques et thermiques mesurés et modélisés en phase sous créneaux

#### 4. Conclusion

Ce travail a permis d'étudier via des approches expérimentales et numériques, le comportement thermo hydrique de la terre crue. La première échelle de caractérisation avec le monitoring de la de la maison terre / paille montre que l'enveloppe avec ce matériau régule l'humidité ambiante par l'effet du "tampon hydrique". Elle fournit également de bonnes conditions de confort thermique en été par l'effet de l'inertie thermique, et par conséquent cela assure de s'affranchir d'une climatisation. Toutefois cette échelle était difficile à caractériser du fait qu'il y a plusieurs paramètres qui participent simultanément. Cependant, à l'échelle centimétrique du matériau, une caractérisation expérimentale a été menée, adaptée au modèle numérique établi. Ainsi, de façons découplées, une méthode inverse a été développée afin de caractériser les propriétés intrinsèques de diffusion hydrique de la terre crue. Cette échelle a concerné la caractérisation du processus de diffusion en y intégrant des comportements hydriques non linéaires ainsi que les isothermes de sorption. Mais les dimensions limitées des échantillons, ainsi que les conditions expérimentales ne conduisent pas aisément, pour des questions de gradients limités d'humidité et de température, à mettre en avant le couplage entre transferts de chaleur et de l'hydrique. Or l'échelle métrique de la paroi étudiée via l'enceinte bi-climatique a permis de caractériser ce couplage. Et le code EF, bien que coûteux en temps de calcul, a conduit à examiner les échanges énergétiques au cœur de la paroi. La motivation finale de l'étude, visée en perspective, est d'appliquer le modèle de transfert couplé établi à l'échelle de la maison habitée en terre/paille, et sur tous types d'enveloppes hygroscopiques.

#### 5. Bibliographie

- [ALL 10] Allinson D., Hall M., 2010, *Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK*, Energy and Buildings 42, 845–852.
- [CAG 14] Cagnon H., Aubert J.E., Coutand M., Magniont C., 2014, *Hygrothermal properties of earth bricks*, Energy and Buildings 80, 208–217.
- [COL 06] Collet F., Serres L., Miriel J., Bart M., 2006, *Study of thermal behaviour of clay wall facing south*, Building and Environment 41, 307–315.
- [GUS 91] Gustafsson S.E., 1991, *Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials*, Review of Scientific Instruments 62, 3, 797-804.
- [LUI 13] Liuzzi S., Hall M.R., P. Stefanizzi, Casey S.P., 2013, *Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate*, Building and Environment 61 82-92.
- [MED 13] Medjelekh D., Ulmet L., Dubois F., 2013, *Effet du comportement thermo-hydrrique de l'enveloppe hygroscopique sur le confort thermique de l'habitat: cas de la terre et la paille*, XI<sup>ème</sup> Colloque CIFQ, 3-5 juin, Reims.
- [MED 15] Medjelekh D., 2015, *Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques*, Thèse de doctorat, Universités : Limoges / Constantine, spécialité G civil/architecture bioclimatique.
- [MER 09] Merakeb S., Dubois F., Petit C., 2009, *Modeling of the sorption hysteresis for wood*, Wood Science and Technology, 43(7-8), 575–589.
- [MOR 01] Morel J.C., Mesbah A., Oggero M., Walker P., 2001, *Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction*, Building and Environment, 36, 1119-26.
- [OTI 09] Oti J.E., Kinuthia J.M., Bai J., 2009, *Engineering properties of unfired clay masonry bricks*, Engineering Geology. 107, 130-139.
- [PAD 99] PADFIELD T., 1999, *The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity*, Ph.D. thesis, University of Denmark.