

Visite de la maison en terre-paille de L'Union (31) instrumentée par le CEREMA

73 chemin de Mange pommes 31520
Ramonville Saint-Agne
www.areso.asso.fr

le 12 octobre 2017



Mot du maître d'ouvrage (Fabrice RUFIER)

Très satisfait de sa maison.

Le seul vrai point noir a été les volets. La fixation des gonds n'a pas été suffisamment anticipée. Les pré-cadres installés n'étaient pas capables de porter les volets. Mais les maîtres d'ouvrage ont leur part de responsabilité puisque cette partie constructive (volets, parquets...) leur incombait.

Maison très performante qui ne nécessite que très peu de chauffage : moins de 200€ de bois par an. 40 cartons de bûches compressées suffisent à passer l'hiver. Seul le poêle à bois chauffe la maison. A part lors de la 1^{ère} année (maison très humide), le sèche-serviette de la salle de bain n'a pas été utilisé.



Fabrice Rufier et
Dominique Faure

Présentation par l'entreprise RAH INVENTERRE SCOP (Thibaud CHASLERIE)

Le permis de construire a été déposé en 2012, la maison était donc soumise à la réglementation thermique 2005. Un test d'étanchéité à l'air a quand même été réalisé : il était de $Q4_{Pa, Surf} = 0,39 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ à la livraison (la RT2012 impose d'être inférieur à 0,6). Un test a été refait par le CEREMA récemment et donne une valeur encore meilleure : 0,33 (moins d'infiltrations grâce à certaines finitions ? protocole de test mieux réalisé ?)

Le chantier a duré d'avril 2013 à février 2014.

Quelques données chiffrées de chantier Inventerre :

- 125 m² habitable sur 2 niveaux
- épaisseur de terre-paille : 30 cm
- densité terre-paille : 350 kg/m³
- 50 m³ de terre-paille pour 168 m² de parois opaques
- 17 tonnes de terre dans le terre-paille + 3 T dans les cloisons en adobes RDC- 3,5 T de paille
- finitions intérieures : enduits terre 2,5 cm et enduits chaux dans la Salle de Bains
- revêtements extérieurs : enduits chaux 2,5 cm en façades S-E et S-O, bardage bois (douglas non traité) en façades N-E et N-O
- 5 m³ de bois d'ossature (provenance Montagne Noire), soit 30 l/m² de mur
- 6,79 m³ de bois pour les planchers/charpentes
- 4500 h de travail pour Inventerre (Rendement de construction des parois en terre-paille : environ 6 h/m² structure comprise, 4 h pour le remplissage seul. Temps de banchage : 12 à 24 h dans les faits. Plus le temps de banchage est long, meilleur c'est pour l'enduit car la paille ressort moins (reste bien « collée »).
- répartition des coûts : 80% de main d'œuvre et 20% de matériaux.

Lot Inventerre : 134 000 €.



Façades S-E et S-O



Façade N-E

Plancher bas : dalle en béton de ciment sur hérisson, terre-plein non isolé pour bénéficier de l'inertie de la terre. En contrepartie, réalisation d'un trottoir périphérique isolé qui fonctionne plutôt bien (pas de sensation froide pieds nus sur le sol) : du verre cellulaire est répandu sur 1 m de large et environ 25 à 30 cm de profondeur, protégé par une membrane EPDM avec un géotextile, le tout recouvert par quelques centimètres de gravier.



Fondations : « classiques » en béton qui reposent sur des pieux de 4 m de profondeur.

Soubassement de la maison en béton cellulaire : avantage d'un matériau non capillaire et relativement isolant qui fait rupture de capillarité et qui permet de couvrir avec le même enduit que le terre-paille. Remarque : aujourd'hui, ajout quand même d'une membrane anti-capillarité sur demande de l'assureur.

Lisse basse de l'ossature bois : 18 cm d'épaisseur. Scellée aux fondations ponctuellement via des poteaux béton ferrailés (queues d'arondes creusées dans Siporex et pointes de charpentiers sous la lisse basse). Il faut compter environ 1 litre de béton par scellement.



Isolation en plafond rampant : 35 cm de ouate de cellulose. Dans les chambres, le revêtement sous rampants est du lambris en peuplier du Gers.

Façades Ouest et Nord bardées de bois. Sous le bardage, l'enduit est le même que sur les autres façades (pas de pare-pluie) pour protéger le terre-paille.

Étanchéité à l'air : assurée par l'enduit extérieur. Continuité avec la toiture via les débords de membrane qui passent sous l'enduit.

Ventilation : VMC simple flux Hygro B

Plancher Étage : plancher acoustique avec couches de sable et de fibres de bois

Cloisons Étage : épaisseur de 12 cm : ossature bois + fermacell + isolant en ouate de cellulose + liège

Mot de l'architecte (Dominique FAURE)

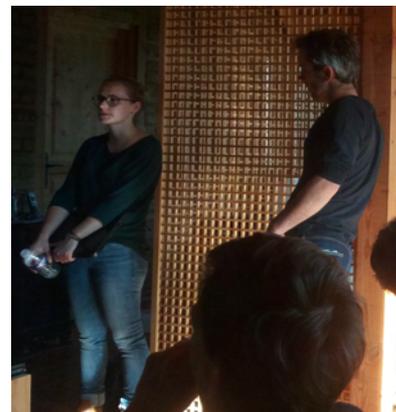
Le plus difficile a été de tenir le programme dans le budget.

Le calage avec Inventerre a été indispensable pour bien connaître le système constructif, le choix des menuiseries etc. Beaucoup d'échanges ont eu lieu avant le permis de construire. Au dépôt de permis, les plans sont aussi précis qu'au stade de la consultation. Du coup pas de surprise derrière. Il est très agréable de travailler ainsi et de caler tous les détails avec l'entreprise.

Présentation de l'étude du CEREMA (Emma STEPHAN)

Au CEREMA (centre d'études et d'expertise sous tutelle du ministère de la Transition écologique et Cohésion des territoires) : Emma est notamment chargée de l'accompagnement de la filière terre-paille.

Une précédente étude a été réalisée sur une maison en terre-paille située à Carla-Bayle réalisée par Inventerre en 2007, en comparaison d'une maison en briques monumur. Une étude actuelle est en cours sur la maison de l'Union visitée ce jour. *Le suivi a démarré le 14 février 2017 et durera 1 an.*



Emma Stephan et Thibaud Chaslerie

CE QUI A ÉTÉ MESURÉ

* **Inertie thermique du matériau (pas de la paroi dans son ensemble)** : déphasage élevé (6h) et amortissement relativement élevé (77%). Mesures effectuées par des sondes à 3 épaisseurs différentes dans le mur.

* **Humidité** : bonne capacité de tampon hygrique¹. L'humidité relative est beaucoup plus stable dans la maison en terre-paille comparée à celle en briques monumur dans des conditions d'utilisations proches.

* **Confort occupants (suivant la norme et pas suivant le ressenti occupant)** : quelques zones sensibles comme la cuisine, même si les occupants se disent très satisfaits, avec davantage de zones de pathologie bactéries/champignons/acariens que dans la maison monumur. Ce problème, lié à une humidité excessive, est a priori plutôt lié à un manque de ventilation (pas de VMC) dans la maison de Carla-Bayle. D'où l'intérêt de suivre maintenant le comportement de la maison de l'Union qui, elle, a une VMC. Capteurs dans la cuisine, le salon et les 3 chambres. Pas de sondes dans la paroi cette fois-ci.

Présence également de sondes CO₂, qui montrent qu'on n'atteint jamais les seuils : le renouvellement d'air est suffisant.

ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES DU CEREMA SUR LE TERRE-PAILLE (voir également le document annexe)

* **Séchage du terre-paille** : 2 caissons expérimentaux sont utilisés, 1 pour l'intérieur et 1 pour l'extérieur. Les caissons sont ventilés, le vent est simulé sur le caisson extérieur mais sans pluie ni rayonnement solaire.

Différentes configurations sont testées : parois de 30 ou 40 cm d'épaisseur, densité de 250 ou 500 kg/m³.

La réglementation thermique incite à davantage isoler, donc à préférer une plus faible densité. Or des études allemandes ont montré que plus il y avait de terre (forte densité) plus ça séchait vite. L'objectif était de voir ce qu'il en est.

Résultat : chez nous c'est l'inverse :

- les parois légères sèchent plus vite, sans influence de l'épaisseur
- l'épaisseur a de l'influence sur les configurations lourdes

* **Modélisation du terre-paille** : via logiciel Wufi Pro®, comparaison du réel avec le modèle. Résultats :

- bonne représentation de la température par le modèle
- mauvaise représentation de l'humidité relative : décalage de la valeur moyenne, déphasage des valeurs extrêmes, amplitude de variation très atténuée par le modèle

Le matériau est très hétérogène, ce qui n'est pas bien simulé. Marche mieux avec le pisé par exemple qui est plus homogène.

Projet pour 2018 : coupler température et humidité relative pour évaluer le confort et les impacts sur les besoins de chauffage.



Mot sur les Guides de Bonnes Pratiques de la construction en terre crue (Alain MARCOM)

Des guides sont en cours de rédaction pour 6 techniques : pisé, briques et adobes, bauge, torchis, terre allégée, enduits, chacun rédigé par une structure ou un groupe de structures. Les guides devraient sortir courant 2018.

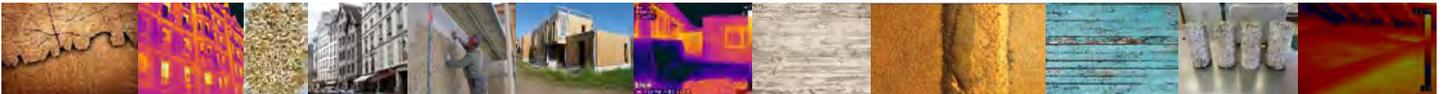
Le CEREMA de Bourgogne a été missionné pour faire des FDES (fiches de déclaration environnementale et sanitaire) pour les 6 techniques.

Le Guide de Bonnes Pratiques Terre Allégée a déjà débouché sur la création d'un site dédié : <https://terrepaille.fr/>

1 ² Le confort hygrique est lié uniquement à l'humidité spécifique

Matériau terre-paille dans le bâtiment

Présentation d'études
Emma STÉPHAN - Cerema



Plan de la présentation

- Le suivi expérimental de maisons individuelles en terre-paille
- Le séchage du terre-paille
- La modélisation du terre-paille et la comparaison avec le comportement réel

Suivi expérimental de maisons individuelles



Cerema

Maison en terre-paille

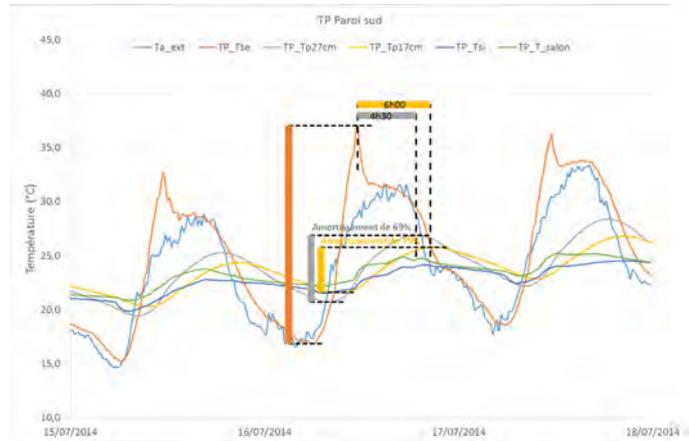
Maison individuelle dans le Sud-Ouest de la France (Carla-Bayle)



| | |
|----------------------|--|
| Date | 2007 |
| Surface | 95 m ² |
| Parois | Enduit chaux-terre Terre-paille (30 cm) Enduit terre |
| Toiture | Tuiles Paille (22 cm) |
| Fenêtres | 4/16/4 |
| Système de chauffage | Poêle de masse |
| Ventilation | Ventilation par ouverture des fenêtres |

Inertie thermique

- **Déphasage élevé** → émission de chaleur de la paroi lors de la diminution de la température extérieure
- **Amortissement relativement élevé** → faibles variations de températures (amélioration du confort)



12 octobre 2017 - L'Union

5

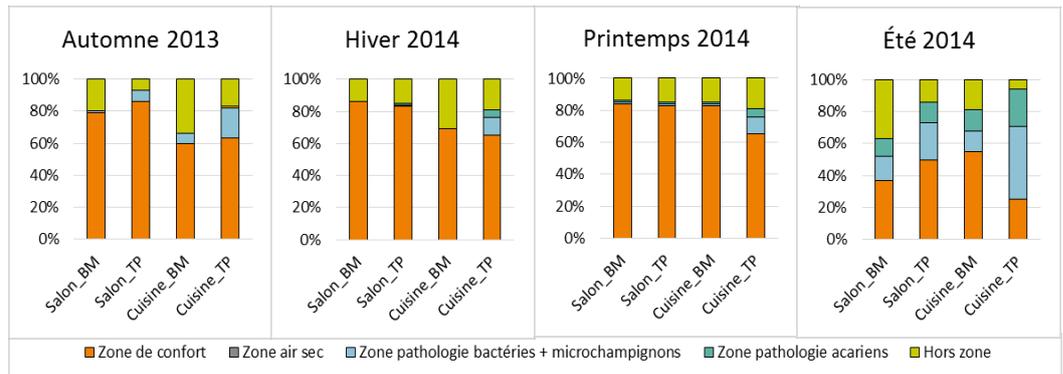
- Transferts hygriques
 - Bonne capacité de tampon hygrique à proximité de la surface extérieure

| | | Briques monomurs | | Terre-paille | |
|----|----------------|------------------|-------|--------------|-------|
| | | Am (%) | Φ (h) | Am (%) | Φ (h) |
| HR | A 7 cm de Sext | 62 | 5:30 | 79 | 10:30 |
| | Au milieu | 53 | 13:45 | 89 | 14:15 |

12 octobre 2017 - L'Union

6

- Très confortable sur les saisons intermédiaires
- Pourcentage de temps dans zone de développement pathologique plus important pour terre-paille
→ cause possible : absence de ventilation mécanique dans la maison TP et Q4Pa élevé dans la maison BM



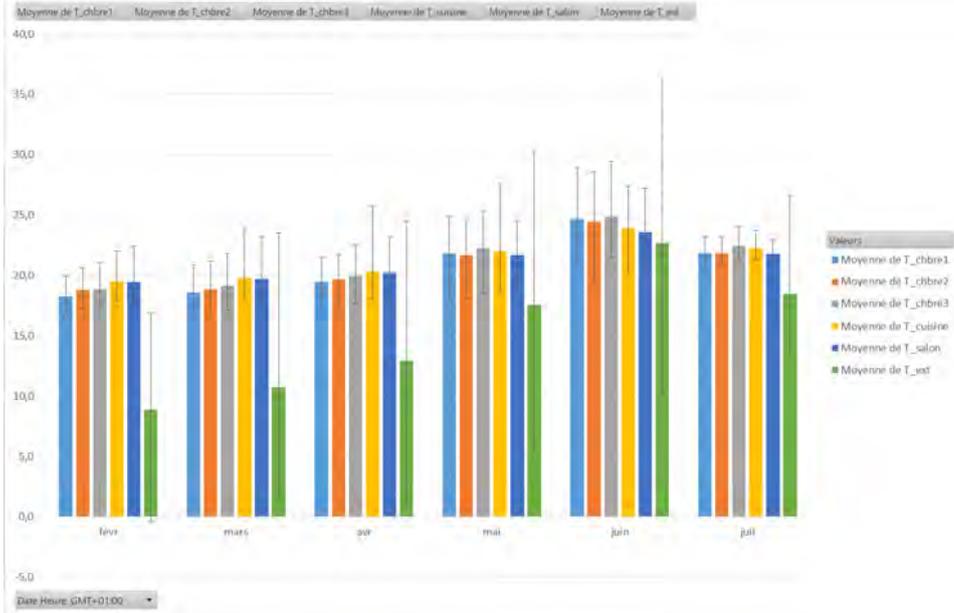
12 octobre 2017 - L'Union

7

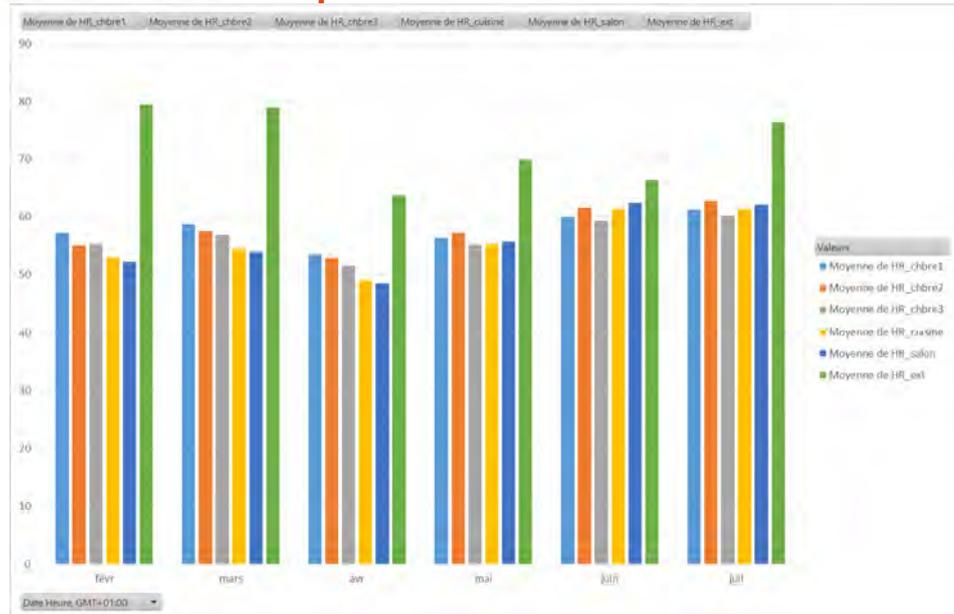
- Etude en cours sur la maison visitée (**L'Union**)
- Objectif : analyse du confort hygrothermique en présence d'une VMC

12 octobre 2017 - L'Union

8



12 octobre 2017 - L'Union



12 octobre 2017 - L'Union

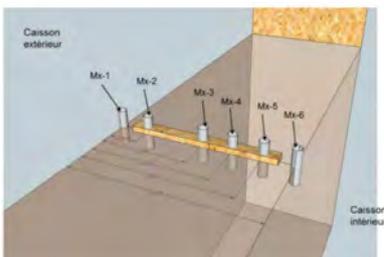
Séchage du terre-paille



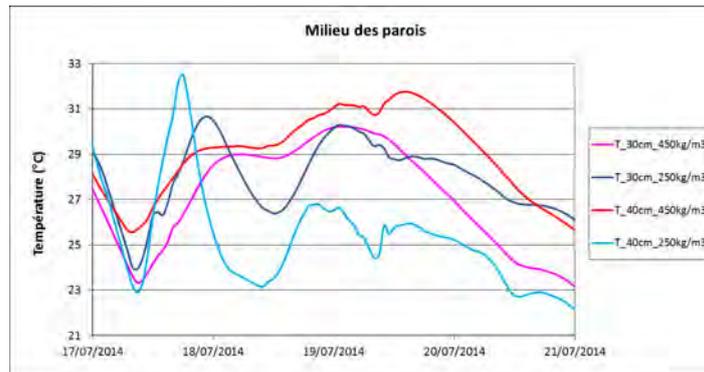
Cerema

Cellule expérimentale

- 2 caissons non isolés séparés par une paroi en terre-paille composée de 4 sections
 - Config. 1 : ép. 30 cm, densité 450 kg/m³
 - Config. 2 : ép. 30 cm, densité 250 kg/m³
 - Config. 3 : ép. 40 cm, densité 250 kg/m³
 - Config. 4 : ép. 40 cm, densité 250 kg/m³



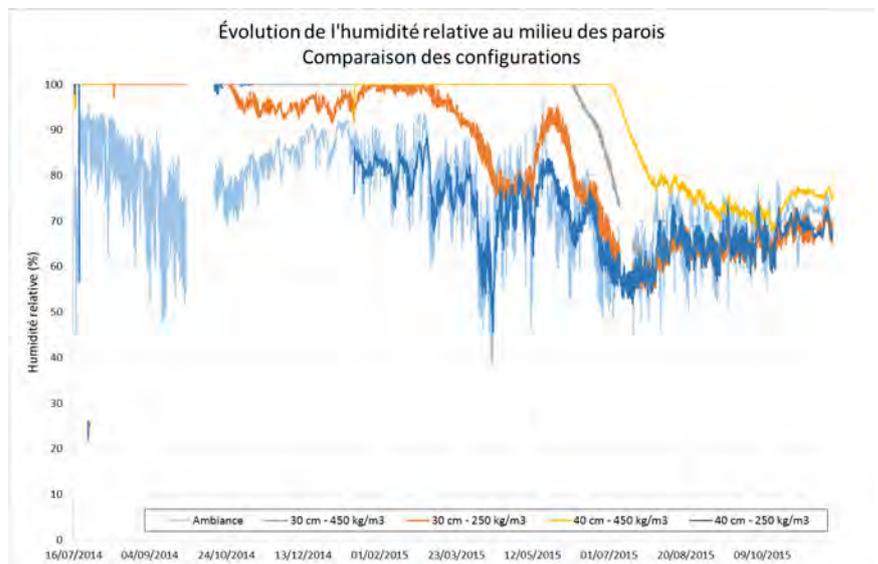
- Hausse de température significative après la mise en œuvre
 - Hausse plus importante pour les parois légères
 - Évolution lissée pour les parois plus lourdes



12 octobre 2017 - L'Union

13

- Séchage plus rapide pour les configurations légères
- Pas d'influence de l'épaisseur sur la durée de séchage des configurations légères
- Influence de l'épaisseur sur la durée de séchage des configurations lourdes



12 octobre 2017 - L'Union

14

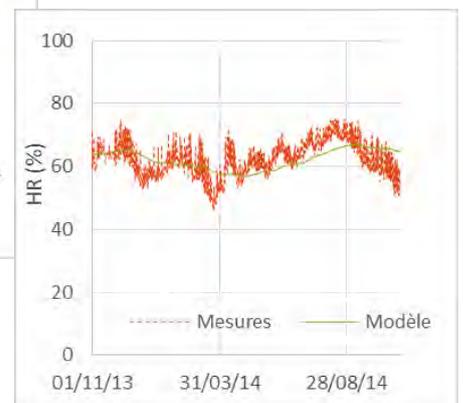
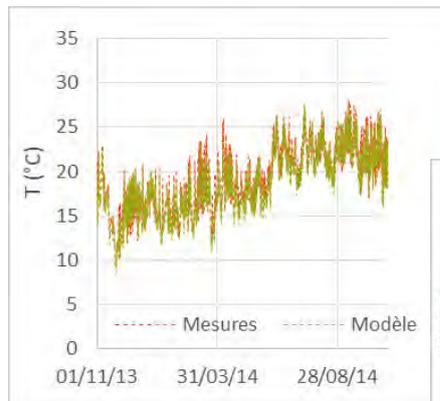
Modélisation du terre-paille



Modélisation

- Bonne représentation de la température par le modèle
- Variation de l'humidité relative retranscrite mais
 - Décalage de la valeur moyenne
 - Déphasage des valeurs extrêmes
 - Atténuation de l'amplitude

→ Mauvaise représentation de l'humidité relative par le modèle





Merci

Emma STEPHAN

Emma.stephan@cerema.fr

05.56.70.66.61



Comparaison du confort hygrothermique d'une maison en terre-paille et d'une maison en briques monomur

OBJECTIFS

- Améliorer la connaissance sur les performances hygrothermiques réelles de bâtiments en terre-paille
- Comparer le comportement de deux bâtiments sur les aspects transferts dans les parois et confort intérieur

1 PRÉSENTATION DES BÂTIMENTS

| | Terre-paille | Brique monomur |
|----------------------|--|--|
| Date | 2007 | 2010 |
| Surface | 95 m ² | 126 m ² |
| Murs | Ossature bois + remplissage terre-paille (30 cm) | Brique monomur (37,5 cm) |
| Toiture | Tuiles + paille (22 cm) | Tuiles + ouate de cellulose (20 cm) |
| Fenêtres | Double vitrage 4/16/4 | Double vitrage 4/16/4 |
| Système de chauffage | Poêle de masse | Poêle à bois |
| Ventilation | Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres | Ventilation naturelle par ouverture des fenêtres |

Photo



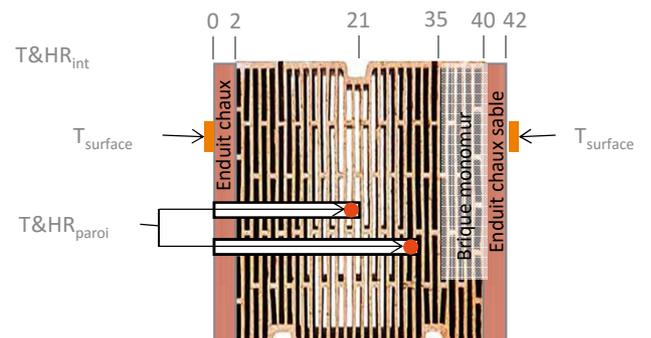
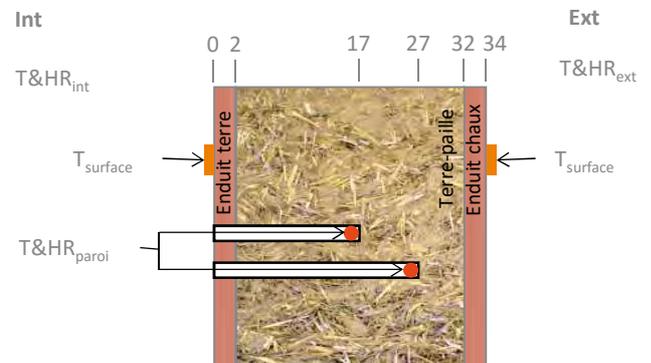
2 SUIVI EXPÉRIMENTAL

Étude de l'enveloppe

- Analyse par thermographie infrarouge
- Test de perméabilité à l'air

Suivi hygrothermique sur une année

- Mesures de confort intérieur (T et HR)
- Mesures de T et HR au sein des murs sud et ouest
- Mesures des conditions météorologiques



3 RÉSULTATS

Performance hygrothermique de l'enveloppe

Inertie thermique

- **Forte capacité d'amortissement et de déphasage** de la température extérieure pour le terre-paille et la brique monomur

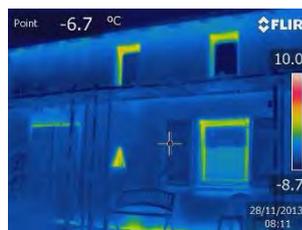
Transferts hygriques

- **Meilleure capacité de tampon hygrique** pour le terre-paille que pour la brique monomur

| | Briques monomurs | | Terre-paille | |
|----------------|------------------|-------|--------------|-------|
| | Am (%) | Φ (h) | Am (%) | Φ (h) |
| A 7 cm de Sext | 73 | 4:45 | 69 | 7:15 |
| Au milieu | 89 | 9:45 | 79 | 9:00 |

Thermographie infrarouge

- Températures de surface homogènes
- **Pas de ponts thermiques liés à l'ossature du terre-paille**
- Déperditions au niveau des liaisons murs/toiture et au niveau des menuiseries
- Ponts thermiques au niveau des liaisons façades poutres pour la maison en briques monomurs



Terre-paille



Briques monomurs

Perméabilité à l'air

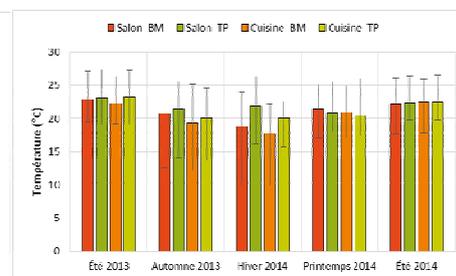
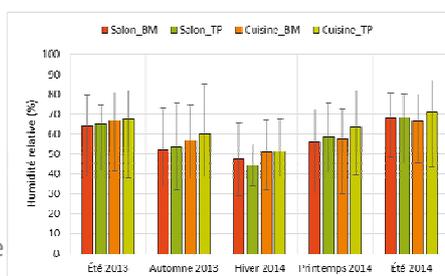
- **Étanchéités à l'air faibles** (seuil RT2012 0,6 m³/(h.m²))
- Fuites au niveau des liaisons plafonds/murs pour la maison en terre-paille
- Fuites au niveau des menuiseries pour la maison en **briques monomurs**

| | Terre-paille | Briques monomurs |
|--|--------------|------------------|
| Q _{4Pa} (m ³ /(h.m ²)) | 1,67 | 4,75 |

Conditions hygrothermiques intérieures

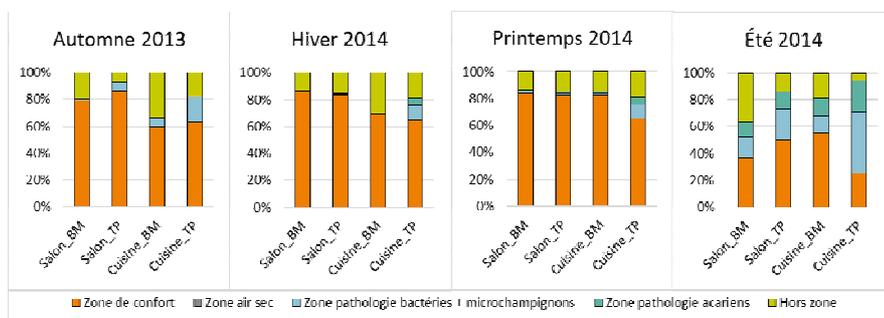
Conditions de température et d'humidité relative

- Maison en **brique monomur plus chaude** d'environ 1°C → variation de température intérieure atténuée par le terre-paille
- **Humidité plus élevée mais plus stable** dans la maison en terre-paille que dans celle en brique monomur



Confort hygrothermique intérieur

- Maison en **brique monomur plus confortable** que terre-paille
- Pourcentage de temps dans zone de développement pathologique plus important pour terre-paille → **absence de ventilation** peut être la cause



4 CONCLUSIONS

- Capacité d'amortissement et de déphasage de la température extérieure élevée pour les deux matériaux
- Meilleure capacité de tampon hygrique pour le terre-paille que pour la brique monomur
- Maison en terre-paille en moyenne légèrement plus chaude et plus humide que celle en brique monomur mais conditions plus stables
- Maison en terre-paille légèrement moins confortable à cause de valeurs d'humidité plus élevées → risque de développement pathologique lié à HR élevée

Comparaison entre modèle et mesures expérimentales du comportement hygrothermique d'une paroi en terre-paille

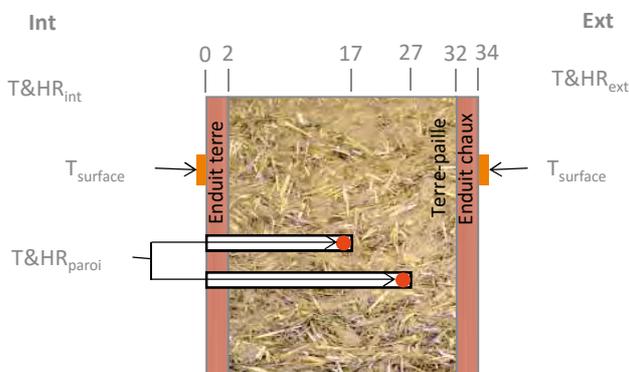
OBJECTIFS

- Améliorer la connaissance sur la prise en compte des spécificités du terre-paille dans les moteurs de calculs
- Comparer un modèle de transferts hygrothermiques usuels avec des mesures expérimentales

1 SUIVI EXPÉRIMENTAL

Cas d'étude

- Paroi en ossature bois et remplissage terre-paille (37,5 cm)
- Enduit terre côté intérieur
- Enduit chaux côté extérieur



Suivi hygrothermique sur une année

- Mesures de confort intérieur (T et HR)
- Mesures de T et HR au sein des murs sud et ouest
- Mesures des conditions météorologiques

3 RÉSULTATS

Comparaison du comportement hygrothermique modèle/mesure

Température

- **Bonne corrélation** entre les mesures et le modèle
- Erreur moyenne : -0,5%

Humidité relative

- **Moins bonne corrélation** : erreur moyenne 5%
- Variation correctement retranscrite mais
 - Décalage de la valeur moyenne
 - Déphasage des valeurs extrêmes
 - Atténuation de l'amplitude
- Pas de retranscription de la variabilité quotidienne

2 MÉTHODOLOGIE

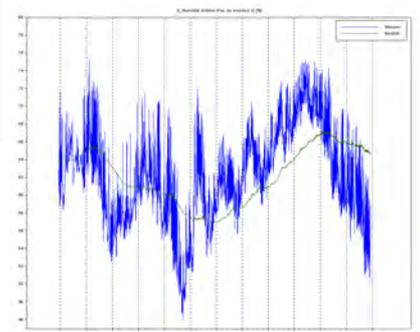
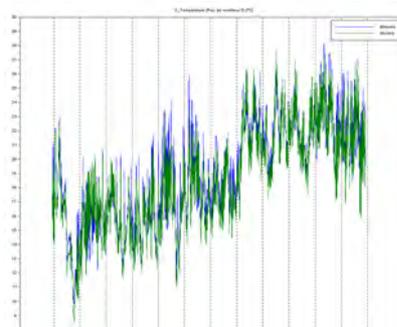
Modélisation de la paroi

- Logiciel Wufi Pro® : équations couplées de transferts de chaleur et de masse de Kunzel
- Hypothèses issues des bases de données Wufi et de la littérature
- Comparaison basée sur 2 indicateurs
 - Erreur quadratique moyenne (CVRMSE)
 - Amplitude des erreurs (NMBE)

Analyse de sensibilité

Objectif : déterminer les paramètres les plus influents sur le modèle

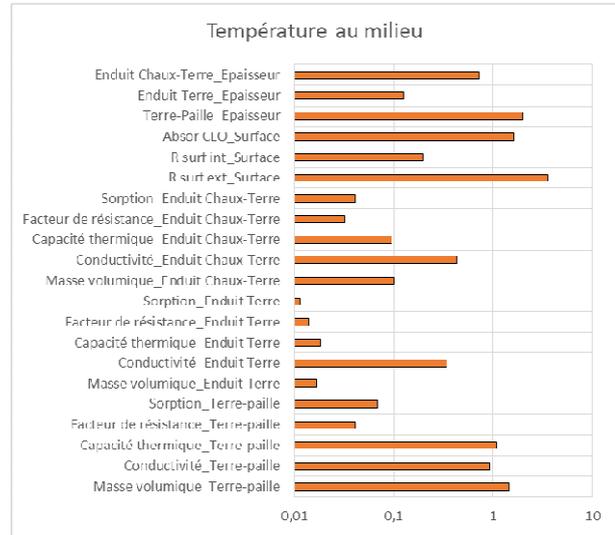
- 21 paramètres retenus
 - Caractéristiques des matériaux terre-paille, enduit terre et enduit terre-chaux
 - Paramètres des conditions aux limites
- 2 niveaux testés pour chaque paramètre
- Calcul d'un indice de sensibilité qui quantifie l'impact du paramètre sur la grandeur considérée



Température

- **Effets faibles** des paramètres sur la température
- 5 paramètres avec un effet supérieur à 1
 - Épaisseur du terre-paille
 - Capacité thermique du terre-paille
 - Masse volumique du terre-paille
 - Coefficient d'absorption courtes longueurs d'onde
 - Résistance superficielle extérieure
- **Effets élevés des conditions aux limites** sur l'ensemble des grandeurs Températures (en surface et au sein de la paroi)

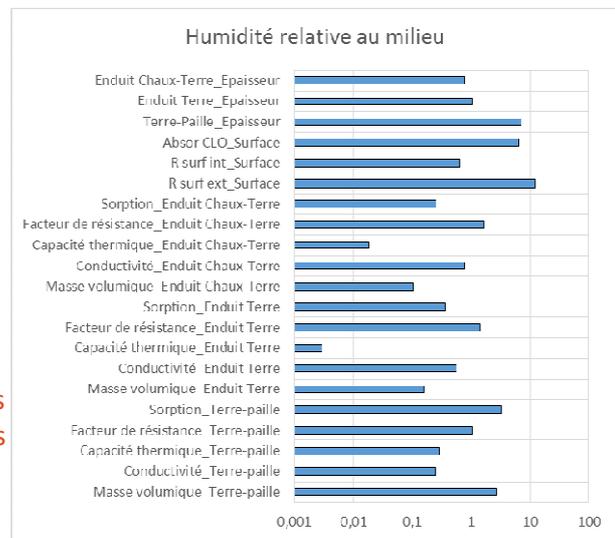
Matériaux
Conditions aux limites



Humidité relative

- **Effets plus importants** des paramètres sur l'humidité relative
- 7 paramètres avec un effet supérieur à 1
 - Épaisseur du terre-paille
 - Isotherme de sorption du terre-paille
 - Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau du terre-paille
 - Masse volumique du terre-paille
 - Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau de l'enduit chaux-terre
 - Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau de l'enduit terre
 - Coefficient d'absorption courtes longueurs d'onde
 - Résistance superficielle extérieure
- **Effets élevés des conditions aux limites** sur l'ensemble des grandeurs Températures (en surface et au sein de la paroi)

Matériaux
Conditions aux limites



Variation de l'impact au fil des saisons

- Effet de la résistance superficielle extérieure et du coefficient d'absorption CLO plus élevé en période hivernale sur T et HR
- Variation journalières de l'effet plus importante en hiver sur T et HR
- Effet du coefficient d'absorption CLO plus important en journée que la nuit sur T et HR
- Effet moindre de l'épaisseur des enduits en hiver sur HR

4 CONCLUSIONS

- Modèle plutôt cohérent avec la réalité mais décalage de la variation d'humidité
- 2 paramètres très influents sur les résultats du modèle :
 - Le coefficient d'échange surfacique extérieur
 - L'absorptivité courte longueur d'onde
- Influence moindre des caractéristiques des matériaux sur les résultats du modèle