

Réhabilitation des bâtiments en tuffeau : études numérique et expérimentale

Inès OTHMEN¹, Philippe POULLAIN^{1*}, Nordine LEKLOU¹

¹LUNAM (L'Université-Nantes-Angers-Le Mans) - GeM, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique - IUT de Saint Nazaire - 58, rue Michel Ange - BP 420 - 44606 Saint Nazaire CEDEX

*(auteur correspondant : philippe.poullain@univ-nantes.fr)

Résumé - La rénovation thermique des bâtiments nécessite l'augmentation de la résistance thermique des parois, par des techniques d'isolation par l'intérieur (ITI) ou l'extérieur (ITE). Cependant, l'ITE ne permet pas de conserver la signature architecturale des bâtiments, notamment les bâtiments en tuffeau de la vallée de la Loire. Cette étude s'inscrit dans cette recherche de techniques d'ITI adaptées aux parois en tuffeau. Le logiciel WUFI est utilisé comme un outil de prédiction du temps de stabilisation des profils de température et de teneur en eau dans les parois. Ces temps permettront ensuite d'établir des plans d'expérience tenant compte de ces contraintes temporelles.

Mots clés : tuffeau, rénovation thermique, transferts couplés chaleur/humidité, WUFI

Nomenclature :

| | | | |
|-----|---|-----------------------|---|
| c | chaleur massique du matériau, $J.kg^{-1}.K^{-1}$ | <i>Symboles grecs</i> | |
| D | diffusivité, $m^2.s^{-1}$ | μ | facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, - |
| e | épaisseur de paroi, m | τ_{sT} | temps de stabilisation de T , h |
| h | coefficient d'échange en paroi, $W.m^{-2}.K^{-1}$ | τ_{sw} | temps de stabilisation de w , h |
| l | longueur caractéristique du milieu, m | λ | conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| T | température, K | φ | humidité relative, - |
| t | temps, s | | |
| w | teneur en eau, $kg.m^{-3}$ | | |

1. Introduction

Les préoccupations en matière de développement durable mettent en lumière l'importance de l'industrie de la construction dans la consommation de ressources naturelles et énergétiques. En France, le bâtiment est à lui seul responsable d'environ la moitié de la consommation d'énergie finale.

Dans ce contexte, les professionnels s'interrogent sur l'isolation du bâti dit « ancien », notamment sur le bâti en tuffeau de la vallée de la Loire. Roche calcaire de forte porosité, le tuffeau favorise le transfert d'humidité dans les parois et l'application de techniques d'isolation classiques est susceptible de bloquer ce transfert. Des réaménagements inadaptés peuvent provoquer une perte de la qualité intrinsèque des parois et engendrer des désordres hydriques et des pathologies diverses (développements de micro-organismes, algues, moisissures). Il n'existe pas actuellement de réponses technologiques durables avérées pour la réhabilitation de bâtiments en tuffeau.

Dans cette étude, l'accent est porté sur l'évaluation de solutions techniques innovantes mettant en œuvre le chanvre en application sèche ou humide. Matériau d'isolation, le béton à base de chanvre semble présenter des performances hygrothermiques compatibles avec la pierre de tuffeau, qu'il s'agit de vérifier. Le choix du chanvre tient également à sa grande disponibilité, à son renouvellement permanent et à son bilan écologique favorable.

Différents systèmes constructifs seront testés selon des approches expérimentale (chambre bi-climatique) et numérique (logiciel WUFI). Cette première partie du travail permettra d'élaborer une base de données regroupant les propriétés nécessaires à la modélisation numérique des transferts couplés chaleur/humidité dans les parois.

Cependant, les temps caractéristiques d'évolution des parois sont des paramètres indispensables à l'élaboration d'un plan expérimental. Du fait du couplage fort entre transfert de chaleur et d'humidité, il est difficile de déterminer ces temps. WUFI apparaît donc comme un outil de prédiction de ces temps, qui est utilisé afin de déterminer les temps de stabilisation des profils de température et de teneur en eau dans des parois d'épaisseur variable.

Dans cet article on s'attache à présenter dans un premier temps les matériaux étudiés, puis les paramètres du modèle utilisé dans WUFI. Les évolutions de différents profils sont alors présentés et discutés sur un cas particulier (paroi de tuffeau de 8cm d'épaisseur). Enfin, on détermine les évolutions des temps caractéristiques d'évolution des profils de teneur en eau τ_{sw} et de température τ_{sT} en fonction des épaisseurs de paroi.

2. Caractérisation des matériaux

2.1. Tuffeau

Le tuffeau blanc est une roche sédimentaire du Turonien (Crétacé supérieur, -90 millions d'années). Il s'agit d'une roche très claire, tendre, principale pierre de taille mise en œuvre dans le patrimoine architectural du Val de Loire [1].

La pierre étudiée ici a été extraite de la carrière souterraine de Lucet. Il s'agit de tuffeau de Saint Cyr (Tuffeau de Touraine). Une image prise au microscope électronique à balayage (MEB) est présentée sur la figure 1. Le tuffeau contient des grains de différentes tailles, les plus gros étant les grains de quartz, de débris silicifiés d'organismes, calcite sparitique, de glauconite et des paillettes de mica. Ces grains sont cimentés par la calcite micritique et par les sphérules d'opale CT.

Les résultats de mesure DRX sont présentés sur la figure 2. On distingue les pics caractéristiques de la calcite (CaCO_3 , noté C sur la figure 2), du quartz (SiO_2 , noté Q) et de l'opale CT (noté O). Le tuffeau contient une proportion de calcite de l'ordre de 50% et une forte proportion de silice partagée principalement entre le quartz, l'opale et les minéraux argileux. Il se classe par conséquent dans les roches silico-calcaires. La proportion moyenne de l'opale cristobalite-tridymite (CT) est de l'ordre de 30% alors que le quartz et les minéraux argileux sont en proportion de 10% chacun [2].

L'isotherme de sorption à 20°C est présentée sur la figure 3. Un modèle d'Oswin a été adapté à ces données expérimentales. Les caractéristiques physiques du tuffeau utilisé sont présentées dans le tableau 1.

2.2. Béton de chanvre

Le béton de chanvre est un mélange de *chènevotte* (morceaux de tige défibrés) et d'un liant (ciment, chaux aérienne, chaux hydraulique ou mélange de ces différents liants). La formulation utilisée dans cette étude est la même que celle proposée par Tran Le [3] et correspond à une application en paroi verticale (voir tableau 1). On remarque que sa conductivité thermique est faible et il peut donc être utilisé à la correction thermique des parois.

La figure 4 présente une isotherme de sorption à 20°C, déterminée par Tran Le [3] et à partir de laquelle les paramètres du modèle d'Oswin ont été déterminés.

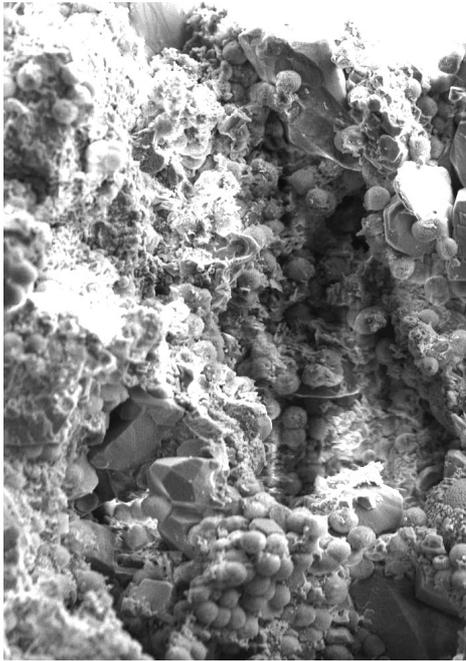


Figure 1: image MEB du tuffeau

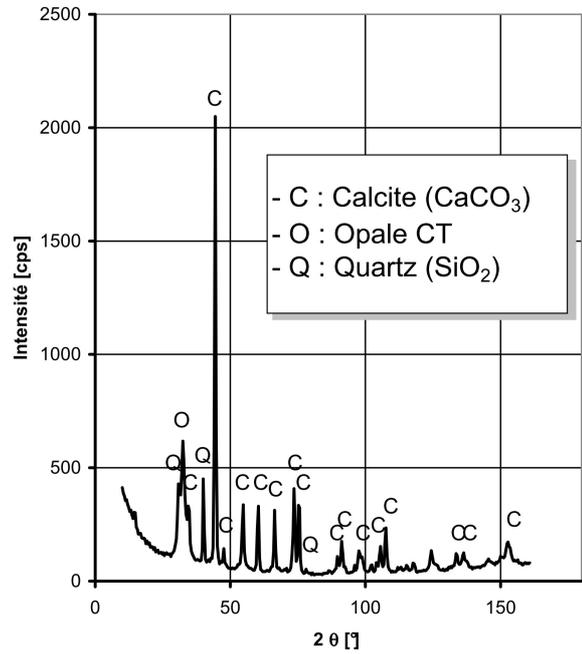


Figure 2: mesure DRX effectuée sur le tuffeau

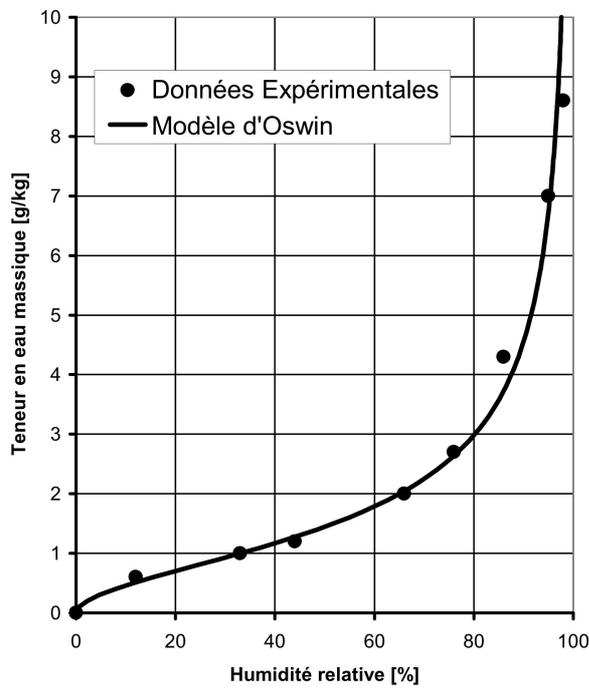


Figure 3: Isotherme de sorption du tuffeau

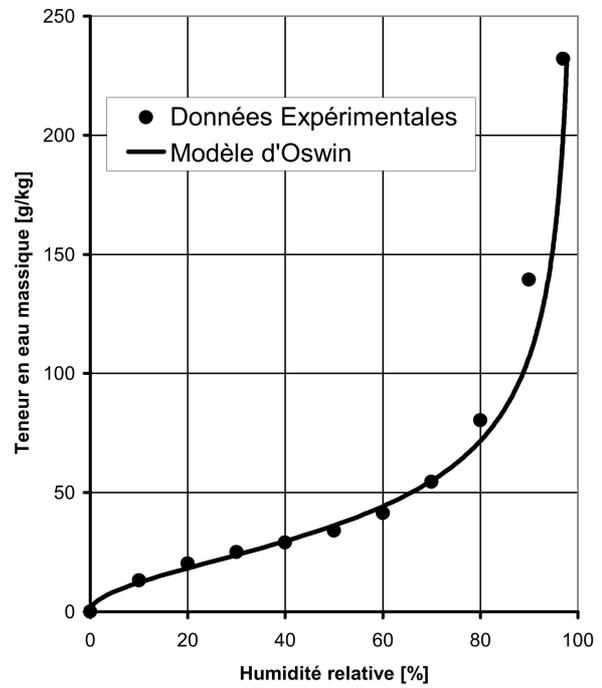


Figure 4: Isotherme de sorption du béton de chanvre

| | Tuffeau | Béton de chanvre |
|---|----------------------|----------------------|
| Masse volumique sèche (kg.m ⁻³) | 1310 | 413 |
| Porosité accessible à l'eau (%) | 48,6% | 63,8% |
| Chaleur massique (J.kg ⁻¹ K ⁻¹) | 1000 | 1000 |
| Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ K ⁻¹) | 0,41 | 0,11 |
| Diffusivité thermique (m ² .s ⁻¹) | 3,1.10 ⁻⁷ | 2,7.10 ⁻⁷ |
| Facteur de résistance à la diffusion de vapeur μ (-) | 20,00 | 8,7 |
| Teneur en eau de référence (kg.m ⁻³) | 42 | 33 |
| Teneur en eau à saturation (kg.m ⁻³) | 472 | 123 |
| Coefficient d'absorption d'eau (kg.m ⁻² .s ^{-0.5}) | 0,50 | 0,028 |

Tableau 1: Principales caractéristiques du tuffeau et du béton de chanvre

3. Simulation numérique

3.1. Paramètres de simulation

Le but de l'étude est de déterminer le temps caractéristique d'évolution de parois simples de tuffeau et de béton de chanvre. Ce temps est un paramètre clé des mesures expérimentales prévues sur une chambre biclimatique et permettra de déterminer la durée d'observation de parois de différentes tailles.

Le milieu est représenté par une paroi plane de longueur $L_y=1\text{m}$ afin de satisfaire à l'hypothèse de propagation unidimensionnel de la chaleur et de l'humidité. L'épaisseur de la paroi L_x est variable et les épaisseurs étudiées sont indiquées dans le tableau 2. Les conditions aux limites sont de troisième espèce pour la température et de première espèce pour l'humidité relative (tableau 2). Les autres frontières sont imperméables et adiabatiques.

| | | Épaisseur (mm) | 20 | 40 | 80 | 160 |
|------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|----|----|-----|
| Conditions initiales | Température initiale | | 20°C | | | |
| | Humidité relative initiale | | 50% | | | |
| Conditions aux limites | Type | | Troisième espèce | | | |
| | Face intérieure x=0mm | T | 20°C | | | |
| | | φ | 50% ($P_v=1168\text{ Pa}$) | | | |
| | | h | 7,7 W/m ² .K | | | |
| | Face extérieure x=80mm | T | 5°C | | | |
| | | φ | 90% ($P_v=786\text{ Pa}$) | | | |
| h | | 25 W/m ² .K | | | | |
| Durée simulée | | 3000 × 1h | | | | |

Tableau 2: Conditions initiales et conditions aux limites

3.2. Évolution temporelles

Les courbes correspondent à la paroi de tuffeau d'une épaisseur de 80 mm. Les profils obtenus pour les autres parois ou pour le béton de chanvre présentent des allures similaires. Ces données sont représentées sur les figures 6 et 7.

On observe un front d'humidification, qui se traduit par une augmentation de la teneur en eau du matériau. On atteint à l'issue d'une durée d'environ 400h, une stabilisation de la totalité du profil de teneur en eau, pour cette paroi de 8cm d'épaisseur. Le profil de température semble nécessiter une durée plus importante pour atteindre le régime permanent linéaire. Sur la figure 6, les cercles noirs (en $x=0\text{mm}$ et $x=80\text{mm}$) correspondent aux températures théoriques calculées selon les hypothèses de paroi plane, en régime permanent, avec conditions de troisième espèce sur les faces intérieures et extérieures et sans prise en compte du transfert d'humidité. Les températures déterminées par le logiciel en ces mêmes points sont légèrement sous-estimées sur la face interne et sur-estimées sur la face externe.

Les évolutions temporelles en différents points de la paroi ($x=0,30,40,50$ et 80mm) sont représentées sur les figures 8 et 9. Les cercles noirs correspondent aux températures théoriques (voir ci-dessus). Comme évoqué plus haut, l'évolution des différents champs est plus rapide en paroi. L'évolution de la teneur en eau au sein de la paroi débute plus tardivement (près de 70h pour le point central). Ces évolutions tardives de la teneur en eau entraînent une variation de la température. Alors qu'au centre, la température est quasiment stabilisée à 100h après une décroissance de type $e^{-\frac{t}{\tau}}$, l'évolution de la teneur en eau entraîne une diminution de la température en ce point.

Ainsi, dans la paroi, la décroissance exponentielle n'est pas observée sur la totalité de l'évolution temporelle. On ne peut donc pas associer de constante de temps à l'ensemble de la décroissance. Il est par conséquent nécessaire de trouver un autre critère d'appréciation. Ces simulations montrent également, qu'une apparente stabilisation de la température en un point, n'est pas suffisante pour justifier d'un régime permanent.

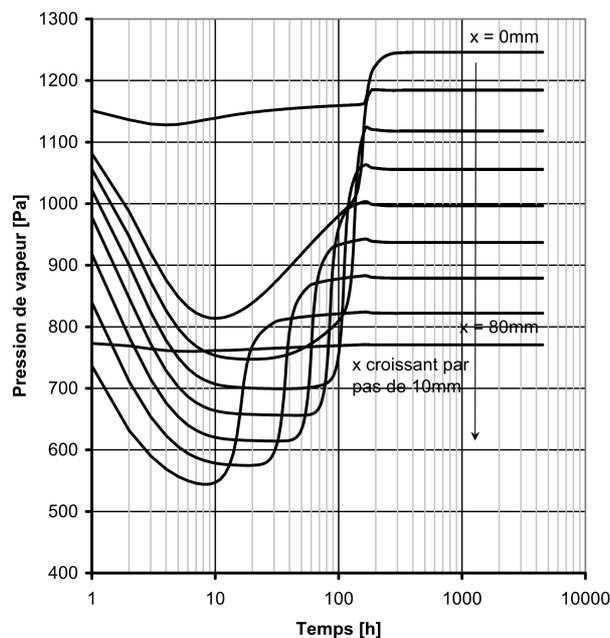


Figure 5: évolution de la pression de vapeur en différents points de la paroi

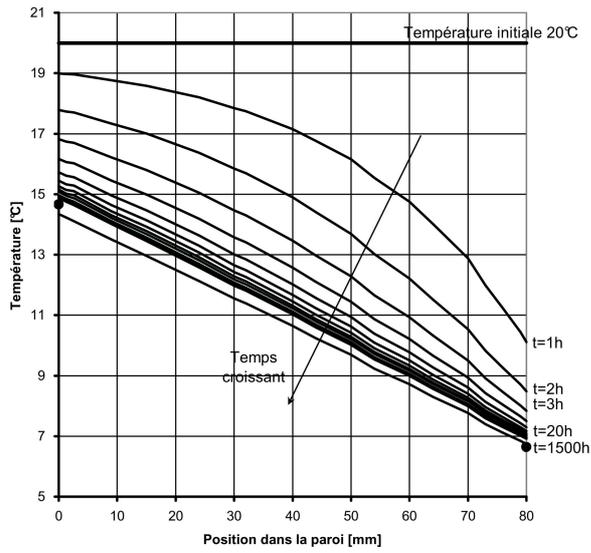


Figure 6: évolution temporelle du profil de température dans une paroi de tuffeau ($e=8\text{cm}$)

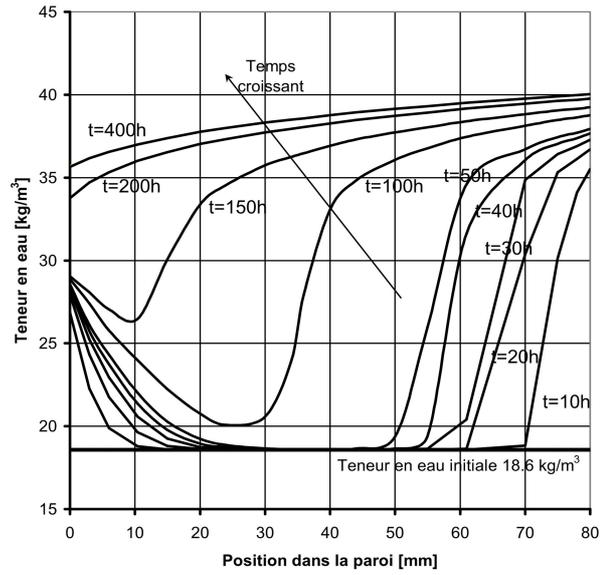


Figure 7: évolution temporelle du profil de teneur en eau dans une paroi de tuffeau ($e=8\text{cm}$)

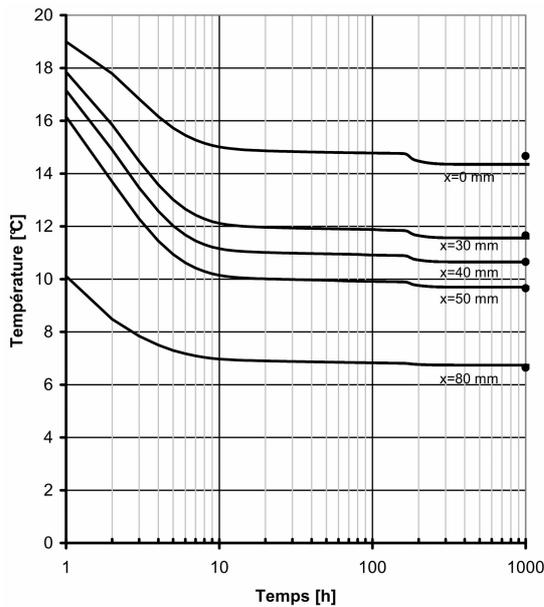


Figure 8: évolution temporelle de la température en différents points de la paroi de tuffeau ($e=8\text{cm}$)

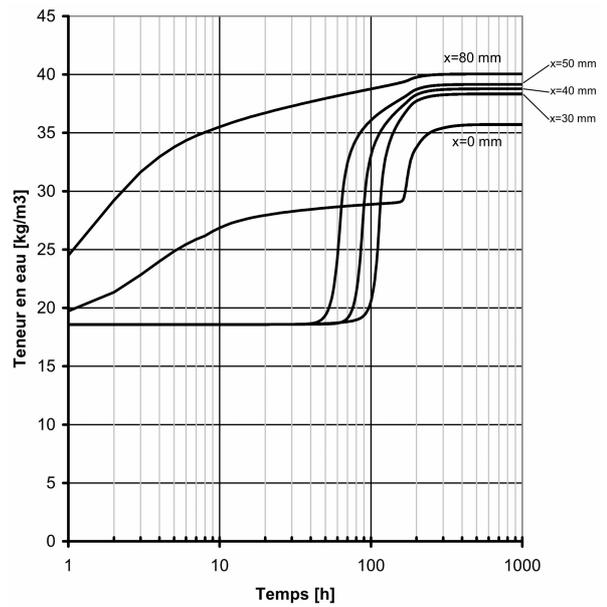


Figure 9: évolution temporelle de w en différents points de la paroi de tuffeau ($e=8\text{cm}$)

3.3. Temps de stabilisation

Le temps nécessaire à l'obtention du régime permanent a été déterminé à partir des simulations. Il ne s'agit pas d'une constante de temps telle qu'on peut la définir habituellement car le modèle exponentiel classique en $e^{-\frac{t}{\tau}}$ n'est pas adapté aux évolutions observées. Aussi, le temps de stabilisation est-il défini à partir de la valeur du champ (température ou teneur en

eau) au centre de la paroi. Ce choix arbitraire est identique pour chaque simulation. Le temps τ_s est défini comme le temps nécessaire à la réalisation de la condition suivante:

$$\left| \frac{T(t) - T_\infty}{T_\infty} \right| \leq 1\% , \text{ où } T(t) \text{ est la valeur du champ à l'instant } t \text{ et } T_\infty \text{ la valeur du champ}$$

à la stabilisation.

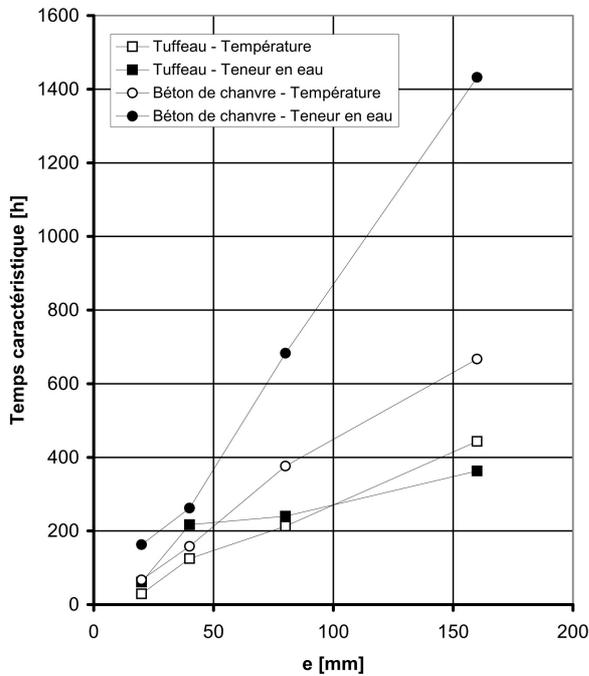


Figure 10: évolution de τ_{sw} et τ_{sT} en fonction de e pour le tuffeau et le béton de chanvre – calculé sur le point central

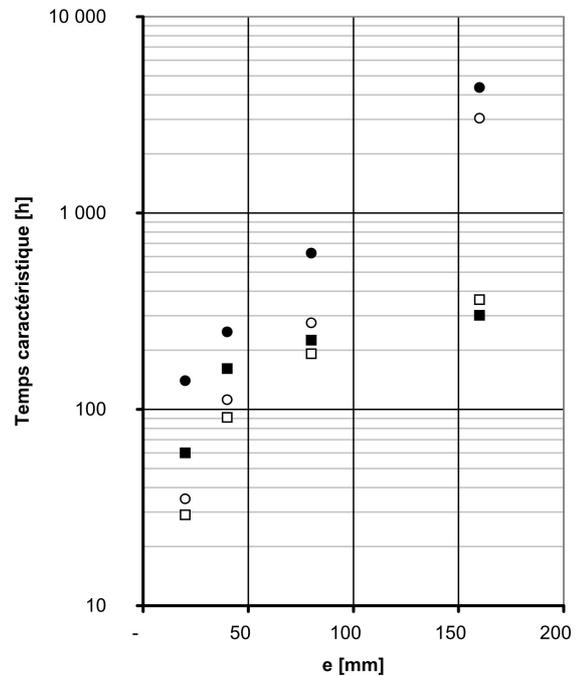


Figure 11: évolution de τ_{sw} et τ_{sT} en fonction de e pour le tuffeau et le béton de chanvre – calculé sur le champ moyen

Les temps de stabilisation τ_{sw} et τ_{sT} sont déterminés pour différentes épaisseurs et pour les parois de béton de chanvre et de tuffeau. La figure 10 semble montrer une évolution linéaire de τ_{sw} et τ_{sT} en fonction de e . Pourtant, dans les phénomènes de diffusion, le temps caractéristique du milieu est généralement lié à la taille caractéristique l du milieu par la relation $\tau = \frac{l^2}{D}$. L'observation va donc à l'encontre de ce résultat, probablement du fait de la variation de la diffusivité en fonction de la teneur en eau du matériau. Les niveaux de teneur en eau atteints n'étant pas les mêmes pour les différentes épaisseurs, la diffusivité à prendre en compte n'est pas la même. Ceci peut également être dû au fait que le contrôle est effectué en un seul point de la paroi et peut dans certains cas ne pas être représentatif de l'évolution globale.

On peut également observer que pour les évolutions de τ_{sT} , les courbes coïncident pour les faibles épaisseurs et divergent avec l'augmentation de cette dernière (pour 160mm par exemple τ_{sT} est de 450h pour le tuffeau et de 660h pour le béton de chanvre). Or, ces deux matériaux ont sensiblement la même diffusivité thermique (voir tableau 1) et devraient présenter pour une même épaisseur un temps caractéristique équivalent.

Sur la figure 11, sont présentées les mêmes données calculées à partir des valeurs moyennes de champs de température et de teneur en eau. On remarque cette fois une

augmentation exponentielle de τ_{sT} et τ_{sw} (droite en coordonnées semi-logarithmiques). Les temps de stabilisation sont donc plus longs déterminés à partir des champs moyens. Ils sont cependant plus représentatifs de l'évolution globale du matériau et seront donc choisis dans la suite de l'étude.

Ces observations montrent la difficulté de déterminer un temps caractéristique d'un milieu soumis à des variations couplées des champs de température et de teneur en eau. Ceci est dû au fait que le transfert de vapeur influe sur le transfert de chaleur et au fait que les propriétés de transfert des matériaux évoluent en fonction de la teneur en eau et de la température.

4. Conclusion

Dans cette étude numérique sur des parois de tuffeau et de béton de chanvre, on a montré les évolutions temporelles de profils de température et de teneur en eau. Ceux-ci ne présentent pas d'évolution exponentielle et il n'est pas possible d'associer à ces variations un temps caractéristique. Il a donc été décidé de déterminer un temps de stabilisation à partir des données numériques en se basant soit sur la valeur des champs au centre de la paroi, soit sur leur moyenne spatiale. Il apparaît que τ_{sT} et τ_{sw} déterminés sur les moyennes spatiales sont bien sûr plus représentatives de l'évolution globale du matériau et seront préférés dans la suite du travail. Les évolutions de τ_{sT} et τ_{sw} en fonction de l'épaisseur semblent exponentielles, ce qui devra être pris en compte dans le dimensionnement des parois à étudier. La suite du travail consistera à dimensionner les parois dans l'optique de leur utilisation dans une cellule bi-climatique et d'élaborer un planning expérimental en tenant compte de ces temps de stabilisation potentiellement longs.

- [1] Dessandier D, 1995. *Étude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine : Application à la durabilité des pierres en œuvre*. Thèse de doctorat, Université de Tours.
- [2] Beck.K et al. *Simulation expérimentale de l'altération des pierres par cyclage, XXIIIèmess Rencontres Universitaires de Génie Civil 2005-Risques& Environnement*
- [3] Tran Le, 2010. *Étude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment*. Thèse de doctorat, Université de Reims champagne-Ardennes

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ADEME pour le financement de ce travail et le CETE de l'Ouest pour son aide dans l'utilisation de WUFI et sa participation à ce travail.