



# **Etude de la rénovation hygrothermique de parois anciennes utilisant des matériaux biosourcés**

Marina Malagoni de Almeida

## **► To cite this version:**

Marina Malagoni de Almeida. Etude de la rénovation hygrothermique de parois anciennes utilisant des matériaux biosourcés. Génie civil. INSA de Toulouse, 2022. Français. ⟨NNT : 2022ISAT0023⟩. ⟨tel-03904224⟩

**HAL Id: tel-03904224**

**<https://theses.hal.science/tel-03904224v1>**

Submitted on 16 Dec 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



# THÈSE

En vue de l'obtention du  
**DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**  
Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de  
Toulouse

---

Présentée et soutenue par  
**MARINA MALAGONI DE ALMEIDA**

Le 11 juillet 2022

**Etude de la rénovation hygrothermique de parois anciennes  
utilisant des matériaux biosourcés**

---

Ecole doctorale : **MEGEP - Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés**

Spécialité : **Génie civil**

Unité de recherche :

**LMDC - Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse**

Thèse dirigée par  
**Stéphane GINESTET et Gilles ESCADEILLAS**

Jury

**Mme Florence COLLET**, Rapporteure  
**M. Karim LIMAM**, Rapporteur  
**M. Emmanuel ANTCZAK**, Examineur  
**Mme Helena CARASEK**, Présidente du jury  
**Mme Sandra GALLEGRO**, Examinatrice  
**M. Stéphane GINESTET**, Directeur de thèse  
**M. Gilles ESCADEILLAS**, Co-directeur de thèse





“You can’t connect the dots looking forward. You can only connect them looking backward. So you have to trust that the dots will somehow connect in your future. You have to trust in something: your gut, destiny, life, karma, whatever. Because believing that the dots will connect down the road, will give you the confidence to follow your heart, even when it leads you off the well-worn path. And that will make all the difference.”

Steve Jobs

## REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide et le soutien de mon entourage, qu'il soit professionnel ou personnel. Je tiens à remercier :

Instituto Federal de Goiás pour le congé formation qui m'a été attribué et qui a permis le financement de mon séjour en France.

Stéphane Ginestet, pour l'opportunité de travailler au LMDC, ce qui m'a permis de côtoyer tous ces chercheurs dont j'ai lu les articles et avec lesquels j'ai eu l'occasion de discuter. Merci aussi pour ta patience et disponibilité à partager tes connaissances. Et, merci pour ce sujet de thèse intéressant et de m'avoir présenté le monde de la thermique du bâtiment.

Gilles Escadeillas, merci pour ta patience, pour ton soutien pendant la rédaction de ce manuscrit et pour les moments sympathiques de coulage et d'essais qu'on a passé ensemble. Shadok va toujours se souvenir de tes explications bien marquées par l'expression « en théorie ».

Sandra Gallego qui m'a transmis toutes ses connaissances en métrologie du bâtiment et qui est arrivée juste un peu tard, mais qui m'a rempli de motivation et m'a fait croire que tout ça était possible. Merci pour tous ses moments de discussion, pour tes corrections, pour le soin que tu as pris avec mes fichiers et avec moi-même.

Fabien Nougardolles de s'être embarqué dans cette aventure *in-situ* à Cahors. Pour les restos, pour les glaces, pour les déjeuners ensemble (oui les glaces d'abord), pour les photos, pour ta compagnie, pour autant de rires, pour m'avoir aidé avec ces systèmes de mesure et ces capteurs et d'avoir toujours gardé la motivation, merci !

Sophie Claude qui m'a aidé dans la mesure de ses possibilités même depuis Zurich. Ce n'était pas facile pour moi d'être comparée avec toi.

Chaimae El Idrissi, avec qui j'ai appris qu'avoir confiance en soi c'est le premier pas pour réussir.

Vincent Proquez, je n'ai pas de mots pour toi. Avec toi j'ai appris les transferts couplés, à simuler sur Delphin, à être pugnace et aussi à me concentrer avec ce « clac clac clac » qui ne sort plus de ma tête. Merci pour tous ces moments de discussion sur les modèles, sur les fluxmètres, merci de ton intérêt.

Matthieu Labat pour les heures consacrés à la discussion de mes données, mes sondes et les transformées de Fourier. Merci d'avoir toujours été sympathique avec moi et de ton intérêt pour mon système de mesures.

Les personnels du LMDC, spécialement Céline Berné et Ghislaine Dupouey. Merci de votre patience avec moi et de votre disponibilité. Merci pour tous ces billets de train, devis, notes de frais, commandes, merci de votre participation fondamentale pendant ces années.

Les techniciens du LMDC, Maud Schiettekatte, Guillaume Lambaré, David Guillouset, David Dupiet, Sylvain dos Santos, Yann Bouaskeur, Frederic Leclerc, Carole Soula, Marc Begué, et surtout Vanessa Mazars avec qui j'ai pu partager quelques tasses de thé et discuter sur les transferts en milieu poreux.

Laura Diaz, ma marraine de thèse et colocataire pendant une année à Toulouse. Merci pour tous ces moments partagés. Pour ces deux confinements qu'on a passés ensemble, pour les discussions par rapport à la vie, j'ai beaucoup appris avec toi, merci.

Collègues de bureau, Margot Ruiz, Lucas Estay, et aussi du bureau à côté, Elza Anglade, Alexandre Malley et Nina Gazal. Merci pour les bons moments à Toulouse et au laboratoire, merci pour les échanges techniques et personnels.

Ecocem, pour la fourniture du laitier. Et aussi à Céline Bacquie et Ludovic André. Merci pour votre aide et explications pendant tous ces années au laboratoire.

Argeco Développement, pour la fourniture du métakaolin. Et aussi à Raphaël Bucher pour sa disponibilité.

Tous les personnels de la mairie de Cahors, Sophie Gomez en particulier. Merci pour ton soutien avec le banc d'essais à Saint-Urcisse et pour les bons moments partagés à l'heure du déjeuner ou du café dans la salle de convivialité.

Camille Pirotas, pour l'aide apporté pendant la mise en place de la centrale Gantner Instruments et aussi pour être devenu la meilleure surprise que la France m'a donnée. De m'avoir aidé à gérer ma frustration scientifique et d'avoir supporté mon humeur qui a oscillé un peu comme mes courbes (sans filtre) surtout durant les derniers moments. Merci pour ta compagnie.

A toute la famille Pirotais, plus spécialement Andrée et Claude, un merci de m'avoir accueilli. Merci pour tous ces bons moments à Nantes, à la Trinité ou à Montbonnot et merci de votre support.

Membres du jury pour l'intérêt que vous portez à ces travaux. A Florence Collet et Karim Limam qui ont accepté de rapporter ce travail et aux examinateurs, Emmanuel Antczak et Helena Carasek.

Mes premiers supporteurs étaient et resteront ma famille et mes amis, à qui je ne pourrais jamais témoigner suffisamment de reconnaissance. Mes parents ont cru en moi et m'ont soutenu depuis le début dans ce choix. Ma petite sœur, qui m'a vu partir si loin et qui a géré pas mal de questions familiales toute seule et ma tante Rosangela, merci pour tout.

Enfin, j'espère être à la hauteur de diffuser ces connaissances au Brésil. C'est un vrai soulagement le fait qu'à Goiás les bâtiments sont quand même moins âgés qu'à Cahors...



## AGRADECIMENTOS

Esse trabalho de tese não seria possível sem o apoio e a ajuda das pessoas que estão à minha volta, tanto pessoalmente quanto profissionalmente. Eu gostaria de agradecer:

Ao Instituto Federal de Goiás, pela licença remunerada que me foi concedida e que possibilitou o financiamento da minha estada na França durante esses quatro anos.

Aos colegas de Jataí por dividirem minha carga horária e possibilitarem minha saída. E em especial à amiga Francielle Coelho que me deu suporte mesmo estando distante. Pelas horas de troca e de conversa por vídeo, por ir me visitar nas poucas vezes que estive no Brasil, por não desistir de mim, por me entender melhor que qualquer outro, muito obrigada.

Ao amigo Plínio Pires, obrigada pela ajuda com a formatação da tese e por estar sempre presente.

Às amigas Cindy e Alessandra, por me acompanharem há mais de 25 anos.

A todos os amigos que contribuíram com o meu crescimento pessoal nesse período em Toulouse: Débora, Bonnie, Dione, Thaís, Jacky, família Panasievks, e em especial Paty, Mayara e Anna Carla que foram inspiração para mim. Obrigada por todos esses momentos maravilhosos.

À minha família, por entenderem e apoiarem as minhas escolhas. Aos meus pais, pelo suporte ao longo de tantos anos de formação e à minha tia Rosangela, que nunca deixou de acreditar no meu potencial e me inspirar a sempre buscar novos desafios. À minha irmã, Mayara Malagoni, pelo suporte desde sempre, por gerenciar sozinha tantas questões familiares complexas e às minhas primas que são como irmãs para mim, Mariana e Valesca, obrigada por entenderem a minha ausência e por se fazerem presentes apesar da distância.



## RESUME

Secteur clé de la lutte contre le changement climatique et de la transition énergétique, le bâtiment doit repenser et transformer son activité tant pour les constructions neuves que pour les bâtiments existants. Si d'un côté la réglementation thermique évolue et conduit le secteur du bâtiment à s'engager de plus en plus dans des démarches de qualité environnementale ; de l'autre les centres anciens des petites et moyennes villes en Europe font face à la dégradation de leur centre historique à cause d'un manque de qualité de l'habitat que seuls les travaux de rénovation et d'amélioration de l'efficacité énergétique peuvent combattre.

La rénovation des bâtiments anciens à valeur patrimoniale est un défi, notamment pour trouver des solutions énergétiquement efficaces et capables de préserver la valeur architecturale de la façade extérieure. Les choix techniques sont limités, l'isolation par l'extérieur est quasi systématiquement exclue au profit de l'isolation par l'intérieur.

Or, cette technique peut bouleverser l'équilibre hygrothermique de la paroi et est susceptible d'entraîner une modification de sa capacité de séchage, un risque de condensation interstitielle et l'apparition de moisissures. Il est donc essentiel d'utiliser des matériaux compatibles avec le bâti ancien et de valider la performance hygrothermique de la paroi après isolation en s'appuyant sur des outils et des méthodes fiables qui permettent de qualifier au mieux les matériaux et techniques d'isolation choisis.

Dans ce contexte, l'utilisation des matériaux biosourcés apparaît comme un levier pour solutionner à la fois l'adéquation des bâtiments anciens aux exigences énergétiques et environnementales, et la préservation du patrimoine.

Le projet de recherche développé dans le cadre de cette thèse vise à concevoir un matériau biosourcé à faible impact environnemental pour un usage en rénovation du bâti ancien. Dans un premier temps une étude sur sa formulation et sa procédure de fabrication est menée, et ses propriétés physiques permettant son usage en rénovation sont déterminées. Ensuite ce matériau est mis en œuvre en rénovation partielle de façade du côté intérieur d'un bâtiment du 13ème siècle localisé dans le centre historique de la ville de Cahors et son comportement hygrothermique *in-situ* est analysé. Finalement, une modélisation des transferts de chaleur et de masse à l'intérieur de la paroi rénovée est effectuée et les résultats sont comparés avec les données obtenues sur le banc d'essais.

Les analyses menées montrent que l'utilisation du matériau développé dans cette étude est favorable à la rénovation des bâtiments anciens grâce à son efficacité hygrothermique. Le modèle numérique mis en place peut aussi être utilisé comme outil pour qualifier les matériaux et techniques de rénovation avant leur mise en œuvre.

**Mots clés :** Matériau biosourcé, rénovation bâtiment historique, transferts de chaleur et de masse, isolation par l'intérieur, performance hygrothermique, monitoring *in-situ*.

## ABSTRACT

A key sector in the fight against climate change and the energy transition, the building sector must rethink and transform its activity for both new constructions and existing buildings. If, on the one hand, thermal regulations are changing and are leading the building sector to engage more and more in environmental quality approaches; on the other hand, the old centers of small and medium-sized towns in Europe are facing the degradation of their historic center due to a lack of quality of habitat that only renovation works and improvements in energy efficiency can fight.

The renovation of old buildings with heritage value is a challenge, in particular to find energy-efficient solutions capable of preserving the architectural value of the exterior facade. The technical choices are limited, insulation from the outside is almost systematically excluded in favor of insulation from the inside.

However, this technique can disturb the hygrothermal balance of the wall and is likely to lead to a modification of its drying capacity, a risk of interstitial condensation and a risk of mold growth. It is therefore essential to use materials compatible with the old building and to validate the hygrothermal performance of the wall after insulation by relying on reliable tools and methods which make it possible to best qualify the materials and insulation techniques chosen.

In this context, the use of biobased materials therefore appears as a lever to solve both, the adequacy of old buildings to energy and environmental requirements, and heritage preservation.

This thesis aims to develop a biobased material with low environmental impact for use in the renovation of old buildings. Initially, a study on its formulation and manufacturing procedure is carried out, and its physical properties allowing its use in renovation are determined. Then this material is applied on a part of the interior side of a building facade from the 13th century located in the historic center of the city of Cahors and its *in-situ* hygrothermal behavior is analyzed. Finally, a modeling of the heat and mass transfers inside the renovated wall is carried out and the results are compared with the field data obtained from the experimental bench.

The analyzes carried out show that the use of the material developed in this study is favorable for the renovation of old buildings thanks to its hygrothermal efficiency. The developed

numerical model can also be used as a tool to qualify renovation materials and techniques before their implementation.

**Keywords:** biobased materials, historical building refurbishment, heat and mass transfer, internal insulation, hygrothermal performance, *in-situ* monitoring.

## LISTE DE FIGURES

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 - Etapes de la thèse.....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 34 |
| Figure 2 - Applications caractéristiques des mélanges chaux-chanvre proposées par les Règles Professionnelles.....                                                                                                                                                                                                       | 40 |
| Figure 3 - Les produits du chanvre (Association InterChanvre, 2020). Disponible sur : <a href="http://www.interchanvre.org">www.interchanvre.org</a> . ....                                                                                                                                                              | 42 |
| Figure 4 - <i>Cannabis sativa</i> . (a) Tige du chanvre. (b) Chènevotte pure. (c) Chènevotte fibrée (Nguyen, 2010).....                                                                                                                                                                                                  | 42 |
| Figure 5 - Microstructure de la tige du chanvre. (a) Observation d'une coupe transversale. (b) Observation d'une coupe longitudinale (Nguyen, 2010).....                                                                                                                                                                 | 43 |
| Figure 6 - Classification de différents sous-ensembles d'AAMs, comparaisons avec la chimie des liants Portland et sulfoalumineux. L'ombrage indique la teneur approximative en alcali ; un ombrage plus foncé correspond à des concentrations plus élevées de Na et/ou K selon (Van Deventer <i>et al.</i> , 2010). .... | 47 |
| Figure 7 - Représentation schématique de la formation des phases dans les liants alcali-activés ; les produits cristallins sont affichés en vert et les produits vitreux en bleu (Provis, 2014). ..                                                                                                                      | 48 |
| Figure 8 - Cinétique de perte de masse des éprouvettes confectionnées par (Nguyen, 2010). 50                                                                                                                                                                                                                             |    |
| Figure 9 - Cliché MEB des fibres de chanvre après 3 mois d'immersion dans une solution saturée de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . (A : x 30 ; B : x 70 ; C : x 200 ; D : x 1000 ; E : x 2000 ; F : x 500) (Magniont, 2010). ....                                                                                              | 52 |
| Figure 10 - Absorption d'eau des granulats de chènevotte (avec et sans prétraitement) en fonction du temps (The Manh, 2014). ....                                                                                                                                                                                        | 54 |
| Figure 11 - Comportement mécanique en compression du béton de chanvre à différents dosages en liant (Cérézo, 2005) .....                                                                                                                                                                                                 | 55 |
| Figure 12 - Variation de la résistance à la compression du béton de chanvre avec la masse volumique apparente sèche dans la littérature. ....                                                                                                                                                                            | 57 |

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 13 - Variation de la conductivité thermique du béton de chanvre avec la densité sèche dans la littérature.....                                                                | 59 |
| Figure 14 - Forme générale de la courbe de sorption-désorption d'un matériau hygroscopique (Piot, 2009).....                                                                         | 61 |
| Figure 15 - Phases constitutives d'un milieu poreux non saturé (Collet, 2004).....                                                                                                   | 63 |
| Figure 16 - Schématisation du réseau poreux d'un matériau (Collet, 2004). ....                                                                                                       | 64 |
| Figure 17 - Isotherme d'adsorption et modes de fixation de l'humidité dans un pore (Collet, 2004 ; Magniont, 2010).....                                                              | 65 |
| Figure 18 - Modes de transfert d'humidité selon la teneur en eau dans les pores (Peuhkuri, 2003). ....                                                                               | 66 |
| Figure 19 - Étapes de transfert d'humidité dans un milieu poreux en fonction de l'hygrométrie (Evrard, 2008 ; Nozahic, 2012).....                                                    | 67 |
| Figure 20 - Plage de confort hygrothermique (Fauconnier, 1992). ....                                                                                                                 | 72 |
| Figure 21 - Cycle de la chaux (Collet, 2004).....                                                                                                                                    | 79 |
| Figure 22 - Chênevotte Biofibat® (a) à l'état sec et (b) après essai d'absorption d'eau.....                                                                                         | 83 |
| Figure 23 - Aperçu global de la méthodologie utilisée pour valider les mélanges étudiés.....                                                                                         | 84 |
| Figure 24 - Paramètres analysés.....                                                                                                                                                 | 84 |
| Figure 25 - Ecoulement et affaissement des mortiers de sable étudiés. La flèche indique l'adjuvant retenu et les lignes en pointillés la plage d'affaissement visée.....             | 89 |
| Figure 26 - Résistance en compression des mortiers de sable en fonctions des différents adjuvants testés, la nomenclature des codes en abscisse est donnée aux tableaux 8 et 9. .... | 90 |
| Figure 27 - Résistance mécanique en fonction du rapport E/L pour les différents adjuvants testés.....                                                                                | 91 |
| Figure 28 - Résistance en compression des mortiers de sable de CHMK et de LTCH en fonction de l'adjuvant retenu et de la cure (carbonatation accélérée ou pas).....                  | 92 |

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 29 - Résistance mécanique des bétons de chanvre coulés sans prétraitement en fonction du type de liant et de l'adjuvant utilisé.....                                                         | 94  |
| Figure 30 - Résistance en compression des mortiers de sable et de chènevotte en fonction de la masse volumique et selon le type de cure appliqué (carbonatation accélérée ou pas). ....             | 95  |
| Figure 31 - Résistance mécanique des mortiers de chanvre coulés sans ou avec prétraitement en fonction du type de liant et de la cure (carbonatation accélérée ou pas) pour l'adjuvant retenu. .... | 98  |
| Figure 32 - Echantillons utilisés et essais réalisés pour la détermination des propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre préfabriqué.....                                        | 100 |
| Figure 33 - Granulats végétaux CHMK après prétraitement en cours de séchage.....                                                                                                                    | 102 |
| Figure 34 - (a) Vibrocompacteur avec moule spécifique et (b) échantillons cubiques après démoulage immédiat.....                                                                                    | 104 |
| Figure 35 - Production des plaques préfabriquées en béton de chanvre. ....                                                                                                                          | 105 |
| Figure 36 - Essai de rupture à la compression des échantillons cubiques.....                                                                                                                        | 106 |
| Figure 37 - Comportement mécanique des bétons de chanvre banchés.....                                                                                                                               | 107 |
| Figure 38 - Comportement mécanique des bétons de chanvre vibrocompactés.....                                                                                                                        | 108 |
| Figure 39 - Résistances mécaniques en compression en fonction des masses volumiques des cubes banchés et vibrocompactés en CHMK et LTCH.....                                                        | 109 |
| Figure 40 - Schéma du test de la coupelle.....                                                                                                                                                      | 110 |
| Figure 41 - Dynamic vapour sorption (DVS).....                                                                                                                                                      | 113 |
| Figure 42 - Courbes de sorption et désorption pour les mélanges étudiés obtenues à partir de la DVS. ....                                                                                           | 114 |
| Figure 43 - Classification MBV expérimental selon NORDTEST.....                                                                                                                                     | 116 |
| Figure 44 - Humidité adsorbée et désorbée au cours des 9 <sup>ème</sup> à 11 <sup>ème</sup> cycles de charge (75% HR) et de décharge (33% HR).....                                                  | 117 |

|                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 45 - Dispositif de mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (Lagouin, 2020).....                                                                                                                               | 120 |
| Figure 46 - Influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du fil chaud.....                                                                                                                             | 121 |
| Figure 47 - Essai d'absorption capillaire sur un matériau homogène (a) et un matériau hétérogène (b) d'après (Scheffler, 2008). ....                                                                                                         | 122 |
| Figure 48 - Résultats des essais d'absorption capillaire. ....                                                                                                                                                                               | 123 |
| Figure 49 - Solutions de chènevotte.....                                                                                                                                                                                                     | 126 |
| Figure 50 - Diffractogrammes de rayons X pour les mélanges CHMK et LTCH. ....                                                                                                                                                                | 128 |
| Figure 51 - Analyse thermogravimétrique des pâtes de CHMK et LTCH avec et sans adjuvant à l'âge de 7 jours. ....                                                                                                                             | 130 |
| Figure 52 - Suivi par microcalorimétrie des pâtes de CHMK et LTCH avec et sans adjuvant à l'âge de 7 jours (en haut flux thermique et en bas flux thermique cumulé). ....                                                                    | 131 |
| Figure 53 - Diffractogramme de rayons X pour les mélanges CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte aux différentes concentrations à l'âge de 7 jours.....                                                                        | 132 |
| Figure 54 - Diffractogramme de rayons X pour les mélanges LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte aux différentes concentrations à l'âge de 7 jours.....                                                                        | 133 |
| Figure 55 - Analyse thermogravimétrique des pâtes de CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte avec et sans adjuvant à l'âge de 7 jours. ....                                                                                     | 133 |
| Figure 56 - Analyse thermogravimétrique des pâtes de LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte avec et sans adjuvant à l'âge de 7 jours. ....                                                                                     | 135 |
| Figure 57 - Courbes de calorimétrie isotherme pour le mélange CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte (en haut le flux thermique et en bas le flux thermique cumulé). ....                                                      | 136 |
| Figure 58 - Courbes de calorimétrie isotherme pour le mélange CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte et/ou de l'adjuvant à même maniabilité (E/L variable). En haut le flux thermique et en bas le flux thermique cumulé. .... | 136 |

|                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 59 - Courbes de calorimétrie isotherme pour le mélange LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte (en haut le flux thermique et en bas le flux thermique cumulé).....                                                      | 137 |
| Figure 60 - Courbes de calorimétrie isotherme pour le mélange LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte et/ou de l'adjuvant à même maniabilité (E/L variable). En haut le flux thermique et en bas le flux thermique cumulé..... | 138 |
| Figure 61 - Clichés MEB sur surface polie des mortiers (gauche) en CHMK (haut) et LTCH (bas) avec analyse EDS (droite). ....                                                                                                                | 139 |
| Figure 62 - Clichés MEB sur fracture du béton de chanvre de CHMK (A : x 50 ; B : x 100 ; C : x 100).....                                                                                                                                    | 140 |
| Figure 63 - Clichés MEB sur fracture du béton de chanvre de LTCH (A : x 100 ; B : x 400 ; C : x 100).....                                                                                                                                   | 141 |
| Figure 64 - (a) Délimitation du centre ancien de Cahors et de la zone étudiée (b) Intégration urbaine de l'îlot Chico Mendes et des deux bâtiments étudiés situés rue Saint-Urcisse.....                                                    | 144 |
| Figure 65 - Façade ouest des bâtiments étudiés et centrales d'acquisition utilisées par étage. ....                                                                                                                                         | 146 |
| Figure 66 - Façade est des bâtiments depuis la rue Saint-Urcisse numéro 50 à gauche et numéro 44 à droite. ....                                                                                                                             | 146 |
| Figure 67 - R+1 : Numéro 50 (pièces 1 et 2) en pan de bois et numéro 44 (pièce 3) en briques massives de la rue Saint-Urcisse. ....                                                                                                         | 147 |
| Figure 68 - Dispositif expérimental au R+1 (50 rue Saint-Urcisse - pièce 2). ....                                                                                                                                                           | 148 |
| Figure 69 - Configuration initiale du R+2 et surface de paroi étudiée (en pointillée rouge). ....                                                                                                                                           | 149 |
| Figure 70 - R+2 : Numéro 50 de la rue Saint-Urcisse avec ossature en pan de bois. ....                                                                                                                                                      | 149 |
| Figure 71 - Configurations étudiées (a) revêtement en polystyrène (état initial) et (b) revêtement en béton de chanvre préfabriqué (état rénové) : en haut le liant en LTCH et en bas le liant en CHMK. ....                                | 150 |
| Figure 72 - Vue du côté intérieur de la paroi en pan de bois au R+1 (dimensions en cm). ...                                                                                                                                                 | 155 |

|                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 73 - Vue du côté intérieur de la paroi en briques massives au R+1 (dimensions en cm).<br>.....                                              | 156 |
| Figure 74 - Vue du côté intérieur de la paroi étudiée - configuration en polystyrène et plâtre.<br>.....                                           | 157 |
| Figure 75 - Vue du côté intérieur de la paroi étudiée - configuration en béton de chanvre<br>préfabriqué. ....                                     | 158 |
| Figure 76 - Configurations étudiées au R+1 et au R+2. ....                                                                                         | 159 |
| Figure 77 - Aperçu général des configurations de chauffage et d'humidification étudiées. .                                                         | 159 |
| Figure 78 - Comparaison avant et après application d'un filtre gaussien pour les données de<br>température d'un thermohygromètre. ....             | 160 |
| Figure 79 - Schéma de la méthode fluxmétrique selon (Teni <i>et al.</i> , 2019).....                                                               | 162 |
| Figure 80 - R+2 - Relevé du 05 Mars au 30 Mai 2021. ....                                                                                           | 165 |
| Figure 81 - Coefficient de transmission thermique au R+2 selon la méthode fluxmétrique.                                                            | 165 |
| Figure 82 - R+1 - Pièce 1 - Relevé du 18 Novembre au 13 Janvier 2022. ....                                                                         | 166 |
| Figure 83 - Coefficient de transmission thermique au R+1 selon la méthode fluxmétrique.                                                            | 167 |
| Figure 84 - R+2 - Relevé du 18 Novembre 2021 au 10 Janvier 2022 pour le revêtement en<br>plaques préfabriquées de béton de chanvre.....            | 168 |
| Figure 85 - Coefficient de transmission thermique au R+2 selon la méthode fluxmétrique pour<br>les plaques préfabriquées en béton de chanvre. .... | 169 |
| Figure 86 - Schéma de la méthode basée sur la température selon (Teni <i>et al.</i> , 2019).....                                                   | 169 |
| Figure 87 - Comparaison des valeurs U au R+1. ....                                                                                                 | 171 |
| Figure 88 - Comparaison des valeurs U au R+2. ....                                                                                                 | 171 |
| Figure 89 - Comparaison des valeurs U sur les deux étages (seulement les données calculées<br>pendant cette thèse). ....                           | 172 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 90 - Comparaison des températures de surface au R+2 avec et sans chauffage. Les lignes en pointillées représentent les thermocouples sur les plaques en LTCH (positionnés au-dessus) et les lignes pleines ceux sur les plaques de CHMK (positionnés en dessous). ..... | 173 |
| Figure 91 - Phénomènes de déphasage (DP) et amortissement (AM). La courbe bleu continue représente les variations de température de surface à l'extérieur de la paroi et la courbe orange en pointillés à l'intérieur (Verbeke et Audenaert, 2018). .....                      | 175 |
| Figure 92 - Evolution des températures de surface pour la paroi en pan de bois avec revêtement en béton de chanvre banché au R+1. ....                                                                                                                                         | 176 |
| Figure 93 - Evolution des températures de surface pour la paroi nue en pan de bois au R+2. ....                                                                                                                                                                                | 177 |
| Figure 94 - Evolution des températures de surface pour la paroi en polystyrène au R+2.....                                                                                                                                                                                     | 178 |
| Figure 95 - Déphasage et amortissement des configurations étudiées. Les barres d'erreurs représentent les écart-types des valeurs obtenues sur 3 journées. ....                                                                                                                | 179 |
| Figure 96 - Positionnement et nomenclature des capteurs au niveaux des parois après rénovation (hors échelle). ....                                                                                                                                                            | 182 |
| Figure 97 - Comportement thermique R+1 - Pièce 1. ....                                                                                                                                                                                                                         | 183 |
| Figure 98 - Comportement hydrique R+1 - Pièce 1. ....                                                                                                                                                                                                                          | 184 |
| Figure 99 - Comportement thermique R+1 - Pièce 3. ....                                                                                                                                                                                                                         | 185 |
| Figure 100 - Comportement hydrique R+1 - Pièce 3. ....                                                                                                                                                                                                                         | 186 |
| Figure 101 - Comportement thermique R+2 - Béton de chanvre avec liant CHMK. ....                                                                                                                                                                                               | 187 |
| Figure 102 - Comportement hydrique R+2 - Béton de chanvre avec liant CHMK. ....                                                                                                                                                                                                | 187 |
| Figure 103 - Comportement thermique R+2 - Béton de chanvre avec liant LTCH. ....                                                                                                                                                                                               | 188 |
| Figure 104 - Comportement hydrique R+2 - Béton de chanvre avec liant LTCH. ....                                                                                                                                                                                                | 188 |
| Figure 105 - Profils d'humidité absolue et de température avant et après humidification pour la pièce 1 au R+1. ....                                                                                                                                                           | 190 |

|                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 106 - Profils d'humidité absolue et de température avant et après humidification pour la pièce 3 au R+1.....                                         | 191 |
| Figure 107 - Profils d'humidité absolue et de température avant et après humidification pour les plaques en CHMK au R+2.....                                | 192 |
| Figure 108 - Profils d'humidité absolue et de température avant et après humidification pour les plaques en LTCH au R+2. ....                               | 192 |
| Figure 109 - Déphasage hydrique de la paroi en béton de chanvre banché au R+1 - Pièce 1. ....                                                               | 194 |
| Figure 110 - Déphasage hydrique de la paroi en béton de chanvre banché au R+1 - Pièce 3. ....                                                               | 195 |
| Figure 111 - Déphasage hydrique de la paroi en béton de chanvre banché au R+2 - CHMK. ....                                                                  | 196 |
| Figure 112 - Déphasage hydrique de la paroi en béton de chanvre banché au R+2 - LTCH. ....                                                                  | 196 |
| Figure 113 - Déphasage hydrique (a) au R+1, selon la pièce étudiée et (b) au R+2 selon le type de bloc étudié. ....                                         | 197 |
| Figure 114 - Aperçu global des paramètres d'entrée du modèle développé.....                                                                                 | 203 |
| Figure 115 - Grandeurs à mettre en place pour les simulations avec le logiciel Delphin.....                                                                 | 204 |
| Figure 116 - Ecart entre les points de sorption expérimentaux et les points calculés par le modèle GAB pour le béton de chanvre banché (Proquez, 2021)..... | 211 |
| Figure 117 - Ecart entre les points de sorption expérimentaux et les points calculés par le modèle GAB pour le béton de chanvre en CHMK.....                | 211 |
| Figure 118 - Ecart entre les points de sorption expérimentaux et les points calculés par le modèle GAB pour le béton de chanvre en LTCH. ....               | 211 |
| Figure 119 - Isotherme de sorption du béton de chanvre banché calculée par le modèle GAB (Proquez, 2021).....                                               | 212 |

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 120 - Isotherme de sorption du béton de chanvre en CHMK calculée par le modèle GAB.<br>.....                                        | 212 |
| Figure 121 - Isotherme de sorption du béton de chanvre en LTCH calculée par le modèle GAB.<br>.....                                        | 213 |
| Figure 122 - Comparaison de la diffusivité liquide calculée avec les valeurs de (Evrard, 2008).<br>.....                                   | 214 |
| Figure 123 - Rayonnements solaires au R+1 (pièces 1 et 3) et au R+2 calculés dans EnergyPlus<br>entre le 15/03/2021 et le 15/03/2022. .... | 216 |
| Figure 124 - Comparaison des résultats de température mesurés et simulés pour le R+1 - Pièce<br>1. ....                                    | 222 |
| Figure 125 - Comparaison des résultats d'humidité relative mesurés et simulés pour le R+1 -<br>Pièce 1. ....                               | 223 |
| Figure 126 - Comparaison des résultats de température mesurés et simulés pour le R+1 - Pièce<br>3. ....                                    | 225 |
| Figure 127 - Comparaison des résultats d'humidité relative mesurés et simulés pour le R+1 -<br>Pièce 3. ....                               | 225 |
| Figure 128 - Comparaison des résultats de température mesurés et simulés pour les plaques en<br>CHMK au R+2. ....                          | 226 |
| Figure 129 - Comparaison des résultats d'humidité relative mesurés et simulés pour les plaques<br>en CHMK au R+2.....                      | 227 |
| Figure 130 - Comparaison des résultats de température mesurés et simulés pour les plaques en<br>LTCH au R+2. ....                          | 228 |
| Figure 131 - Comparaison des résultats d'humidité relative mesurés et simulés pour les plaques<br>en LTCH au R+2. ....                     | 228 |
| Figure 132 - Coefficient de Pearson et MAE des données de température aux différents<br>emplacements étudiés. ....                         | 230 |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 133 - Coefficient de Pearson et MAE des données d'humidité relative aux différents emplacements étudiés. .... | 230 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 1 - Notations cimentières. ....                                                                           | 29  |
| Tableau 2 - Notations abrégées, formules chimiques et noms des phases minérales rencontrées dans ce mémoire. .... | 29  |
| Tableau 3 - Notations du bâtiment. ....                                                                           | 30  |
| Tableau 4 - Principaux modes de transport d'humidité dans les matériaux de construction (Seng, 2018). ....        | 71  |
| Tableau 5 - Composition chimique des matériaux utilisés dans les liants (données fabricant). ....                 | 78  |
| Tableau 6 - Composition minéralogique de la NHL5 de Saint Astier (données fabricant).....                         | 80  |
| Tableau 7 - Composition minéralogique du métakaolin (Pouhet, 2015).....                                           | 81  |
| Tableau 8 - Formulations des mortiers de sable en CHMK. ....                                                      | 86  |
| Tableau 9 - Formulations des mortiers de sable en LTCH.....                                                       | 86  |
| Tableau 10 - Formulations des mortiers de chènevotte en CHMK. ....                                                | 93  |
| Tableau 11 - Formulations des mortiers de chènevotte en LTCH.....                                                 | 93  |
| Tableau 12 - Formulations pour le prétraitement des mortiers de chènevotte en CHMK. ....                          | 96  |
| Tableau 13 - Formulations pour le prétraitement des mortiers de chènevotte en LTCH. ....                          | 96  |
| Tableau 14 - Formulation restante des mortiers de chènevotte en CHMK. ....                                        | 96  |
| Tableau 15 - Formulation restante des mortiers de chènevotte en LTCH.....                                         | 96  |
| Tableau 16 - Formulations pour le prétraitement des bétons de chanvre en CHMK. ....                               | 100 |
| Tableau 17 - Formulation restante des bétons de chanvre en CHMK.....                                              | 101 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 18 - Formulations pour le prétraitement des bétons de chanvre en LTCH. ....                                                                      | 101 |
| Tableau 19 - Formulation restante des bétons de chanvre en LTCH. ....                                                                                    | 101 |
| Tableau 20 - Perméabilité et facteur de résistance à la vapeur d'eau moyen des mélanges étudiés. ....                                                    | 112 |
| Tableau 21 - Valeurs théoriques et expérimentales de capacité de tampon hydrique en fonction du liant utilisé. ....                                      | 119 |
| Tableau 22 - Propriétés de transferts hydriques issues du test de capillarité. ....                                                                      | 124 |
| Tableau 23 - Concentrations des solutions de chènevotte. ....                                                                                            | 126 |
| Tableau 24 - Nomenclature des mélanges analysés. ....                                                                                                    | 126 |
| Tableau 25 - Description des capteurs utilisés sur le banc <i>in-situ</i> . ....                                                                         | 153 |
| Tableau 26 - Dimensions des capteurs utilisés sur le banc <i>in-situ</i> . ....                                                                          | 154 |
| Tableau 27 - Caractéristiques de base du béton de chanvre et de la brique saisies dans Delphin. ....                                                     | 207 |
| Tableau 28 - Vue et composition des maillages des quatre configurations étudiées : en rouge la paroi en briques et en bleu le revêtement biosourcé. .... | 221 |
| Tableau 29 - Coefficient de Pearson et erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour la pièce 1. ....                   | 223 |
| Tableau 30 - Coefficient de Pearson et erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour la pièce 3. ....                   | 225 |
| Tableau 31 - Coefficient de Pearson et erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour les plaques en CHMK au R+2. ....   | 227 |
| Tableau 32 - Coefficient de Pearson et erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour les plaques en LTCH au R+2. ....   | 229 |

# SOMMAIRE

|                                                                                                         |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>INTRODUCTION .....</b>                                                                               | <b>33</b>  |
| <b>CHAPITRE 1 CONTEXTE ET ETAT DE L'ART .....</b>                                                       | <b>37</b>  |
| <b>1.1 DEVELOPPEMENT DURABLE ET RENOVATION.....</b>                                                     | <b>37</b>  |
| <b>1.2 BETON DE CHANVRE.....</b>                                                                        | <b>39</b>  |
| 1.2.1 Généralités.....                                                                                  | 39         |
| 1.2.2 Constituants.....                                                                                 | 41         |
| 1.2.3 Fabrication et mise en œuvre .....                                                                | 49         |
| 1.2.4 Propriétés.....                                                                                   | 54         |
| <b>1.3 TRANSFERTS EN MILIEUX POREUX.....</b>                                                            | <b>63</b>  |
| 1.3.1 Stockage et transport de l'humidité.....                                                          | 64         |
| 1.3.2 Effets de la température sur les transferts d'humidité.....                                       | 68         |
| 1.3.3 Effets de l'humidité sur les transferts de chaleur .....                                          | 69         |
| <b>1.4 MODIFICATION DE L'ENVIRONNEMENT INTERIEUR .....</b>                                              | <b>71</b>  |
| <b>CHAPITRE 2 OPTIMISATION DE LIANTS BAS CARBONE POUR BLOC<br/>PREFABRIQUE EN BETON DE CHANVRE.....</b> | <b>75</b>  |
| <b>2.1 OPTIMISATION DE LA PHASE LIANTE .....</b>                                                        | <b>75</b>  |
| 2.1.1 Choix des constituants.....                                                                       | 76         |
| 2.1.2 Choix de l'adjuvant sur mortier de sable .....                                                    | 84         |
| 2.1.3 Essais sur mortiers de chènevotte.....                                                            | 92         |
| 2.1.4 Mélanges retenus.....                                                                             | 98         |
| <b>2.2 CARACTERISATION DES BETONS DE CHANVRE .....</b>                                                  | <b>99</b>  |
| 2.2.1 Fabrication des corps d'épreuve.....                                                              | 99         |
| 2.2.2 Caractérisation mécanique .....                                                                   | 106        |
| 2.2.3 Caractérisation hygrothermique .....                                                              | 110        |
| <b>2.3 ANALYSE MICROSTRUCTURALE .....</b>                                                               | <b>125</b> |
| 2.3.1 Matériaux et méthodes .....                                                                       | 125        |
| 2.3.2 Résultats .....                                                                                   | 128        |
| 2.3.3 Observation au microscope électronique à balayage .....                                           | 139        |
| <b>2.4 CONCLUSIONS .....</b>                                                                            | <b>141</b> |

|                   |                                                                                              |            |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CHAPITRE 3</b> | <b>INSTRUMENTATION <i>IN-SITU</i></b>                                                        | <b>143</b> |
| <b>3.1</b>        | <b>PRESENTATION DU CAS D'ETUDE</b>                                                           | <b>143</b> |
| <b>3.2</b>        | <b>DESCRIPTION DETAILLEE DES PAROIS ET DE LEUR INSTRUMENTATION</b>                           | <b>150</b> |
| 3.2.1             | Mesures de température et d'humidité                                                         | 151        |
| 3.2.2             | Mesures de flux thermiques                                                                   | 152        |
| 3.2.3             | Positionnement détaillé des capteurs                                                         | 155        |
| <b>3.3</b>        | <b>MONITORING A LONG TERME DES DIFFERENTES PAROIS</b>                                        | <b>158</b> |
| 3.3.1             | Comportement thermique des parois                                                            | 160        |
| 3.3.2             | Comportement hydrique des parois                                                             | 180        |
| <b>3.4</b>        | <b>CONCLUSIONS</b>                                                                           | <b>198</b> |
| <b>CHAPITRE 4</b> | <b>MODELISATIONS NUMERIQUES ET SIMULATIONS</b>                                               | <b>201</b> |
| <b>4.1</b>        | <b>OUTIL NUMERIQUE : DELPHIN 6.1</b>                                                         | <b>203</b> |
| 4.1.1             | Equations de bilan                                                                           | 205        |
| 4.1.2             | Données matériaux                                                                            | 206        |
| 4.1.3             | Fonctions des matériaux                                                                      | 207        |
| 4.1.4             | Données climatiques                                                                          | 214        |
| 4.1.5             | Conditions aux limites                                                                       | 216        |
| 4.1.6             | Conditions initiales et maillage                                                             | 220        |
| <b>4.2</b>        | <b>RESULTATS DES SIMULATIONS</b>                                                             | <b>221</b> |
| 4.2.1             | Méthode de validation des résultats                                                          | 221        |
| 4.2.2             | Etage R+1 - Pièce 1 - Paroi ossature en pan de bois et revêtement en béton de chanvre banché | 222        |
| 4.2.3             | Etage R+1 - Pièce 3 - Mur ossature brique massive et revêtement en béton de chanvre banché   | 224        |
| 4.2.4             | Etage R+2 - Mur ossature pan de bois et revêtement en béton de chanvre préfabriqué           | 226        |
| <b>4.3</b>        | <b>RECENSEMENT DES SOURCES D'ERREURS</b>                                                     | <b>231</b> |
| <b>4.4</b>        | <b>CONCLUSIONS</b>                                                                           | <b>233</b> |
|                   | <b>CONCLUSIONS GENERALES</b>                                                                 | <b>235</b> |
|                   | <b>PERSPECTIVES DE RECHERCHE</b>                                                             | <b>239</b> |
|                   | <b>REFERENCES</b>                                                                            | <b>241</b> |
|                   | <b>ANNEXE</b>                                                                                | <b>251</b> |

## Notations du ciment

Le Tableau 1 ci-dessous présente les notations cimentières utilisées.

Tableau 1 - Notations cimentières.

| Oxydes                         | Notations |
|--------------------------------|-----------|
| CaO                            | C         |
| SiO <sub>2</sub>               | S         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | A         |
| CO <sub>2</sub>                | $\bar{C}$ |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | F         |
| H <sub>2</sub> O               | H         |
| SO <sub>3</sub>                | $\bar{S}$ |

Dans le Tableau 2 ci-dessous, nous rappelons les différentes phases minéralogiques rencontrées dans ce mémoire, leurs formules chimiques et les notations employées pour les désigner.

Tableau 2 - Notations abrégées, formules chimiques et noms des phases minérales rencontrées dans ce mémoire.

| Notations                                                 | Formule chimique                                                                                                  | Noms utilisés                         |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| C <sub>2</sub> S                                          | Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ou 2CaO.SiO <sub>2</sub>                                                         | Silicate dicalcique                   |
| C <sub>3</sub> S                                          | Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> ou 3CaO.SiO <sub>2</sub>                                                         | Silicate tricalcique                  |
| CH ou Po                                                  | Ca(OH) <sub>2</sub>                                                                                               | Hydroxyde de calcium, Portlandite     |
| Ca                                                        | CaCO <sub>3</sub>                                                                                                 | Calcite                               |
| Va                                                        | CaCO <sub>3</sub>                                                                                                 | Vatérite                              |
| Ar                                                        | CaCO <sub>3</sub>                                                                                                 | Aragonite                             |
| An                                                        | TiO <sub>2</sub>                                                                                                  | Anatase                               |
| Qz                                                        | SiO <sub>2</sub>                                                                                                  | Quartz                                |
| Tr                                                        | SiO <sub>2</sub>                                                                                                  | Tridymite                             |
| Mu                                                        | Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub> ou 3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>             | Mullite                               |
| Mc ou<br>C <sub>4</sub> AcH <sub>11</sub>                 | Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>7</sub> CO <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>11</sub>                   | Monocarboaluminate de calcium hydraté |
| Hc ou<br>C <sub>4</sub> Ac <sub>0.5</sub> H <sub>12</sub> | Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (CO <sub>2</sub> ) <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>12</sub> | Hémicarboaluminate de calcium hydraté |
| C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>                           | Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>13</sub>                                   | Aluminates de calcium hydratés        |
| C <sub>2</sub> ASH <sub>8</sub>                           | Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>8</sub>                                  | Stratlingite, Gehlénite hydraté       |
| C <sub>2</sub> ASH <sub>6</sub>                           | Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>                                  | Hydrogrenat                           |
| Hy                                                        | Mg <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>16</sub> .(H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub>               | Hydrotalcite                          |

## Notations du bâtiment

Dans le Tableau 3 ci-dessous, nous rappelons la nomenclature utilisée pour l'analyse des transferts de chaleur et de masse au niveau des parois.

Tableau 3 - Notations du bâtiment.

| Notations          | Grandeur                                                                             | Unités                                    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $A_{cap}$ ou $A_w$ | Coefficient d'absorption capillaire d'eau                                            | $kg/(m^2 \cdot s)$                        |
| AM                 | Amortissement thermique                                                              | -                                         |
| $a_{sw}$           | Coefficient d'absorption du rayonnement solaire                                      | -                                         |
| $b_m$              | Effusivité hydrique                                                                  | $kg/m^2 \cdot Pa \cdot \sqrt{s}$          |
| $F_{cp}$           | Capacité thermique                                                                   | $J/(kg \cdot K)$                          |
| $C_{p,l}$          | Capacité thermique massique de l'eau liquide                                         | $J/(kg \cdot K)$                          |
| $C_{p,v}$          | Capacité thermique massique de la vapeur d'eau                                       | $J/(kg \cdot K)$                          |
| $D_a$              | Coefficient de diffusion                                                             | $m^2/s$                                   |
| DP                 | Déphasage thermique                                                                  | h ou jours                                |
| $D_{T,a}$          | Coefficient de diffusivité de vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de température | $kg/(K \cdot m \cdot s)$                  |
| $D_w$              | Coefficient de diffusivité hydrique (transferts liquides)                            | $m^2/s$                                   |
| $D_{w(mbv)}$       | Diffusivité hydrique (transferts de vapeur)                                          | $m^2/s$                                   |
| $g_l$              | Densité de flux liquide                                                              | $kg/(m^2 \cdot s)$                        |
| $g_{pv}$           | Flux de vapeur dû à un gradient de pression de vapeur                                | $kg/(m^2 \cdot s)$                        |
| $g_{T,a}$          | Densité de flux de vapeur ou d'eau liquide due à un gradient de température          | $kg/(m^2 \cdot s)$                        |
| $g_{tot}$          | Flux total d'humidité                                                                | $kg/(m^2 \cdot s)$                        |
| $g_v$              | Densité de flux de vapeur                                                            | $kg/(m^2 \cdot s)$                        |
| $g_w$              | Flux d'eau liquide dû à un gradient de teneur en eau                                 | $kg/(m^2 \cdot s)$                        |
| $h$                | Coefficient d'échange thermique superficiel                                          | $W/(m^2 \cdot K)$                         |
| HA                 | Humidité absolue                                                                     | $kg \text{ d'eau} / kg \text{ d'air sec}$ |
| HR ou $\phi$       | Humidité relative                                                                    | %                                         |
| K                  | Conductivité hydraulique                                                             | $kg/(Pa \cdot m \cdot s)$                 |
| $L_v$              | Chaleur latente de vaporisation                                                      | $kJ/kg$                                   |
| MBV                | <i>Moisture Buffer Value</i> ou capacité de tampon hydrique                          | $kg/(m^2 \cdot \%HR)$                     |
| $p_c$              | Pression capillaire                                                                  | Pa                                        |
| $p_v$              | Pression de vapeur                                                                   | Pa                                        |
| $p_{vs}$           | Pression de vapeur saturante                                                         | Pa                                        |
| $q$ ou $q_{diff}$  | Densité de flux de chaleur                                                           | $W/m^2$                                   |
| $q_{lat}$          | Quantité de chaleur due aux effets latents                                           | $W/m^2$                                   |
| $q_{sens}$         | Quantité de chaleur sensible véhiculée par la vapeur et l'eau liquide                | $W/m^2$                                   |
| R                  | Résistance thermique                                                                 | $m^2 \cdot K/W$                           |
| $R_v$              | Constante des gaz parfaits                                                           | $Pa \cdot L/(mol \cdot K)$                |
| T                  | Température                                                                          | K                                         |
| t                  | Temps                                                                                | s                                         |

|                                  |                                                                              |                                                     |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| u                                | Teneur en vapeur d'eau                                                       | kg/m <sup>3</sup> ou kg/kg                          |
| U                                | Coefficient de transmission thermique ou transmittance thermique             | W/(m <sup>2</sup> .K)                               |
| v                                | Vitesse                                                                      | m/s                                                 |
| w                                | Teneur en eau liquide                                                        | kg/m <sup>3</sup> ou kg/kg                          |
| $\delta_p$                       | Perméabilité à la vapeur d'eau sous gradient de pression partielle de vapeur | m <sup>2</sup> /s                                   |
| $\delta_v$                       | Perméabilité à la vapeur d'eau sous gradient de concentration de vapeur      | m <sup>2</sup> /s                                   |
| $\theta_{cap}$                   | Teneur en humidité capillaire                                                | kg/m <sup>3</sup> ou m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| $\theta_{por}$                   | Porosité ouverte                                                             | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>                      |
| $\theta_{sat}$ ou $\theta_{eff}$ | Teneur en humidité à saturation                                              | kg/m <sup>3</sup> ou m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| $\lambda$                        | Conductivité thermique                                                       | W/(m.K)                                             |
| $\mu$                            | Résistance à la vapeur d'eau                                                 | -                                                   |
| $\rho$                           | Masse volumique                                                              | kg/m <sup>3</sup>                                   |
| $\rho_v$                         | Concentration de vapeur d'eau                                                | kg/m <sup>3</sup>                                   |



# INTRODUCTION

Les dernières décennies en Europe du Sud ont connu de forts déplacements de population des cœurs de villes historiques vers leur périphérie. Les centres anciens ont souvent perdu de leur attractivité, du fait de la précarité énergétique des habitants, du manque de confort des logements, ainsi que de la concurrence de la production neuve (Sites & Cités remarquables de France, 2019).

Pour répondre à la fois à la problématique du déclin de son centre historique et aux enjeux environnementaux du XXI<sup>e</sup> siècle, liés à la consommation énergétique des bâtiments, un projet de rénovation d'immeubles a été mis en place par la communauté d'agglomération du Grand Cahors depuis 2014. Le projet nommé ENERPAT (Energie et Patrimoine) a pour objectif la reconquête de son centre ancien en passant par l'écორénovation de ses bâtiments.

La procédure d'écორénovation s'attache aux pratiques visant à modérer ou à réduire l'impact environnemental des rénovations. Elle prend en compte, au-delà de la performance énergétique, l'empreinte carbone de l'ensemble du processus, comme la fabrication des matériaux, des équipements, leur réutilisation en fin de vie, *etc.* Cette définition, plus exigeante, intègre notamment l'utilisation des matériaux biosourcés (issus de la matière organique renouvelable d'origine végétale ou animale).

Dans le cadre du projet ENERPAT s'insère la thèse de (Claude, 2018). L'auteur a étudié la rénovation de la façade de deux bâtiments mitoyens situés dans le centre historique de Cahors dans le but de proposer des préconisations pour la rénovation énergétique des bâtiments d'habitation des centres anciens (médiévaux). Cependant, le temps de séchage du revêtement choisi était très élevé en raison de la technique de mise en œuvre utilisée. Cela a entraîné l'impossibilité de l'exploitation des résultats relatifs au comportement du matériau *in-situ*.

La présente thèse se propose de donner suite aux travaux commencés par (Claude, 2018). Dans un premier temps nous présentons une nouvelle formulation de matériau biosourcé pour usage en rénovation de bâtiment ancien. Pour éviter la problématique du temps de séchage, la préfabrication est choisie et le matériau est produit sous format de blocs à assembler avec une quantité réduite d'eau. Ceux-ci sont ensuite caractérisés en laboratoire afin de connaître leurs propriétés.

Dans un deuxième temps, le revêtement préfabriqué est appliqué sur la face intérieure d'une façade d'un des bâtiments étudiés par (Claude, 2018) non utilisée initialement par l'auteur. Le revêtement mis en place par l'auteur ayant eu le temps de sécher, nous avons pu comparer le comportement *in-situ* des deux revêtements simultanément. Pour cela, l'installation d'un système d'acquisition de données comprenant toutes les façades rénovées a été effectuée.

Finalement, une simulation numérique du comportement *in-situ* de ces façades après rénovation est présentée et comparée avec les données obtenues à partir du système d'acquisition mis en place.

La Figure 1 décrit les différentes étapes de la thèse.

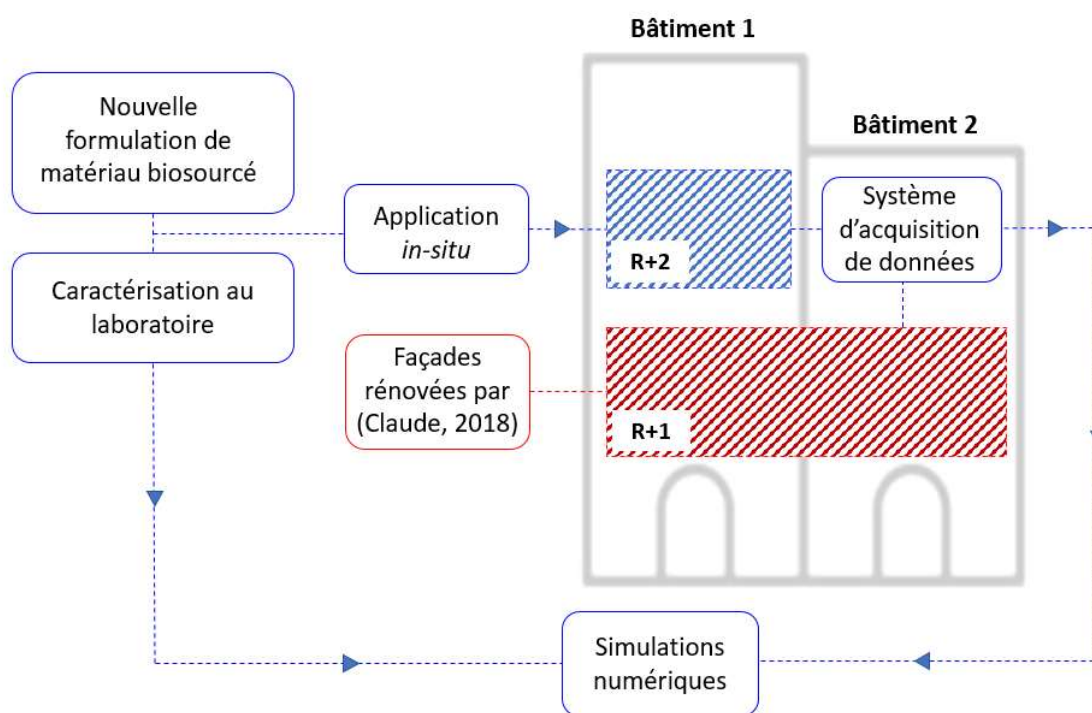


Figure 1 - Etapes de la thèse.

Cette thèse a donc pour objectifs de contribuer à l'élaboration de nouveaux matériaux biosourcés pour la rénovation du bâti ancien, de donner des recommandations sur l'écorénovation et sa faisabilité et de présenter un outil de validation de la performance hygrothermique au niveau des façades après isolation pour les bâtiments anciens.

Le manuscrit est structuré en cinq chapitres.

Le premier chapitre dresse un état des connaissances sur le contexte environnemental, les transferts hygrothermiques en milieux poreux ainsi que les performances des bétons de chanvre. Les trois axes principaux de la recherche sont répartis entre les chapitres deux à quatre.

Le deuxième chapitre est consacré à l'optimisation de liants bas carbone pour usage en bloc préfabriqué de béton de chanvre en vue de la rénovation de bâtiments anciens.

Le troisième chapitre traite de la performance *in-situ* des bétons de chanvre formulés dans le chapitre précédant. Ce chapitre présente les bâtiments étudiés et aborde également la mise en place du banc expérimental à Cahors.

Le quatrième chapitre présente un modèle numérique des façades rénovées permettant la prédiction de leur comportement hygrothermique. Les données de la caractérisation du matériau au laboratoire et les données environnementales de température et d'humidité relative obtenues *in-situ* sont utilisées comme données d'entrée. Les résultats obtenus par simulation numérique sont confrontés aux mesures expérimentales afin de valider le modèle.

Le dernier chapitre présente les conclusions générales et les perspectives de recherche.



# CHAPITRE 1 CONTEXTE ET ETAT DE L'ART

## 1.1 Développement durable et rénovation

L'urgence écologique fait incontestablement partie des défis majeurs de ce début du XXI<sup>e</sup> siècle. Le secteur du bâtiment a été identifié comme un secteur clé pour l'atténuation du changement climatique (Masson-Delmotte *et al.*, 2018). Dans l'Union européenne (UE), les bâtiments consomment 40% de l'énergie finale et sont à l'origine de 36% des émissions de carbone issus d'énergie fossile (European Commission, 2021b).

Depuis 2010 l'Europe a mis en place plusieurs directives avec une série d'exigences sur la consommation énergétique des bâtiments neufs et existants pour viser les engagements climatiques de l'accord de Paris.

En décembre 2021, une révision de la directive sur la performance énergétique des bâtiments (European Commission, 2021a) a été proposée. Le cadre réglementaire existant est mis à jour pour refléter des ambitions plus élevées et des besoins plus pressants en matière d'action climatique et sociale. Le document explique également comment l'Europe peut parvenir à un parc immobilier à zéro émission et entièrement décarboné d'ici 2050.

La réduction de la consommation d'énergie et des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) liés au chauffage et à la climatisation des locaux constitue un potentiel évident pour atteindre cet objectif puisque les impacts découlant de la consommation d'énergie opérationnelle d'un bâtiment jouent généralement le rôle le plus important (Heeren *et al.*, 2015). Grâce à la rénovation, les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment peuvent être améliorées et donc l'énergie de fonctionnement réduite.

Cependant, des études ont également montré que les émissions résultant de la production et de l'installation d'éléments dans le système de construction, qui sont généralement appelées impacts intrinsèques, peuvent représenter de 10% à 80% des émissions totales au cours du cycle de vie du bâtiment (Röck *et al.*, 2020). Cela montre l'importance de trouver des matériaux et des solutions techniques viables à faible impact carbone pour la rénovation.

En France, cette prise de conscience des problèmes environnementaux se traduit dans le domaine de la construction par des réglementations, comme les réglementations thermiques.

Alors que l'ancienne réglementation thermique (RT 2012) porte sur le seul critère de performance énergétique, la nouvelle Réglementation Environnementale 2020 (RE 2020) conjugue un objectif de performance énergétique très élevé visant le Bâtiment à Énergie POSitive (BEPOS) et un objectif limitant la quantité de carbone rejeté sur tout le cycle de vie du bâtiment. Il s'agit d'une avancée majeure dans la prise en compte globale des impacts environnementaux d'un bâtiment en accord avec l'objectif européen d'obtenir un parc immobilier entièrement décarboné.

Cependant, les bâtiments anciens ne sont pas concernés pour l'instant. Ils suivent les recommandations de l'ancienne réglementation thermique au format « élément par élément » et plusieurs exceptions sont appliquées en cherchant, de manière générale, à ne pas imposer de travaux qui pourraient nuire à sa pérennité (Claude 2018).

Au niveau de l'isolation des parois opaques (murs de façades constitués de matériaux anciens), l'application de la réglementation thermique n'est pas exigée (article 2, arrêté du 3 mai 2007), en raison des risques d'incompatibilité de l'isolation rapportée avec le mur d'origine. Cette incompatibilité est liée au fait que les murs anciens sont perméables à la vapeur d'eau et l'utilisation de matériaux conventionnels du marché, comme les mousses issues de la chimie du pétrole (mousse de polyuréthane, polystyrène expansé ou extrudé par exemple) qui sont imperméables, entraîne une rupture de l'équilibre hygrothermique de la paroi et du comportement plus général du bâti ancien (ventilation, perméabilité, *etc.*).

La procédure d'écorénovation utilisant des isolants biosourcés constitue donc une solution prometteuse pour l'isolation des façades anciennes. Elle permet d'une part de prévoir les évolutions du cadre législatif, non seulement au niveau de la consommation énergétique, mais aussi au niveau de l'empreinte carbone globale de la rénovation, et d'autre part, d'éviter les problèmes et dysfonctionnements liés à la perméabilité de l'enveloppe.

Le choix des constituants d'un isolant biosourcé dans le domaine de la construction civile se traduit par le choix d'une matrice liante et d'un granulats d'origine végétale et plusieurs solutions peuvent être envisagées. Dans le cadre de cette thèse, le choix de la matrice liante sera discuté au chapitre deux. Le granulats choisi correspond à la chènevotte issue du processus de défibrage de la tige du chanvre.

Ce choix se justifie par la grande disponibilité du produit sur le marché et aussi par le fait que la France est leader européen des surfaces cultivées de chanvre (Association InterChanvre, 2018). De plus, la culture du chanvre s'inscrit dans une démarche respectueuse de l'environnement par son itinéraire technique sans produit phytosanitaire, sans irrigation et sans organisme génétiquement modifié (OGM). Enfin, la construction en chanvre fait l'objet de règles professionnelles permettant son assurabilité.

Le produit résultant du mélange entre la matrice liante et la chènevotte est appelé béton de chanvre. Il se présente comme un matériau prometteur pour l'usage en écorénovation des bâtiments anciens grâce à ses propriétés hygrothermiques et écologiques comme on peut constater sur plusieurs travaux développés dans les 20 dernières années (Magniont, 2010 ; Nozahic, 2012 ; Seng, 2013 ; The Manh, 2014 ; Claude, 2018 ).

Dans la suite, nous présentons un aperçu global des différents travaux de recherche menés sur le béton de chanvre ainsi que les propriétés qui doivent être mises en avant pour la procédure de rénovation.

## **1.2 Béton de chanvre**

### **1.2.1 Généralités**

Un béton au sens conventionnel du terme consiste en un mélange entre un liant minéral, des granulats, également minéraux, et de dimension graduée, et de l'eau. Par analogie, ce que nous définissons comme agro-béton est « un mélange entre des granulats issus de végétaux lignocellulosiques provenant directement ou indirectement de l'agriculture ou de la foresterie, majoritaires en volume, et un liant minéral » (Amziane et Arnaud, 2013 ; Amziane et Sonebi, 2016).

Dans le cas du béton de chanvre, la chènevotte ne joue pas le rôle de squelette solide indéformable comme c'est le cas des granulats minéraux dans un béton classique. C'est donc le liant qui produit le squelette rigide et la cohésion entre les granulats déformables. L'emploi d'un liant de résistance mécanique importante peut donc augmenter la résistance mécanique de l'agro-béton, à condition que sa prise ne soit pas compromise ni par l'absorption d'eau de la chènevotte (Nguyen, 2010) ni par ses extraits solubles (Walker et Pavia, 2014).

La présence du granulat végétal confère au béton de chanvre un comportement élastoplastique non fragile avec une grande déformabilité sous contrainte, une absence de fracturation et une ductilité marquée. Par contre, du fait de l'absorption d'eau élevée des granulats végétaux (environ 350% de leur poids) et des interactions entre les extraits solubles de ces granulats et le liant, ces agro-bétons présentent généralement une faible résistance mécanique et un temps de séchage élevé.

Selon (Nguyen *et al.*, 2009), le béton de chanvre présente deux spécificités que l'on doit prendre en compte pour le formuler et qui expliquent ses caractéristiques : il comprend l'association entre un liant rigide dont le comportement mécanique est fragile, avec un granulat souple (la chènevotte) dont le comportement mécanique est ductile ce qui peut conduire à des concentrations de contraintes aux interfaces matrice/granulat quand le matériau est soumis à des sollicitations, ce qui réduit sa performance mécanique. Il faut aussi intégrer les interactions physiques et chimiques entre la pâte de liant et la chènevotte.

La variation des proportions entre la chènevotte et le liant permet d'obtenir des matériaux ayant différentes caractéristiques mécaniques, thermiques et acoustiques, couvrant ainsi plusieurs domaines d'applications dans la construction : chapes d'égalisation sur plancher, dalles de béton léger, remplissage ou doublage d'ossature bois, murs banchés, blocs préfabriqués (Nguyen, 2010). Les Règles Professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre (Construire en chanvre, 2012) proposent trois applications caractéristiques des mélanges selon le rapport massique de liant et de granulats végétaux (toit, mur et enduit) comme montré sur la Figure 2.

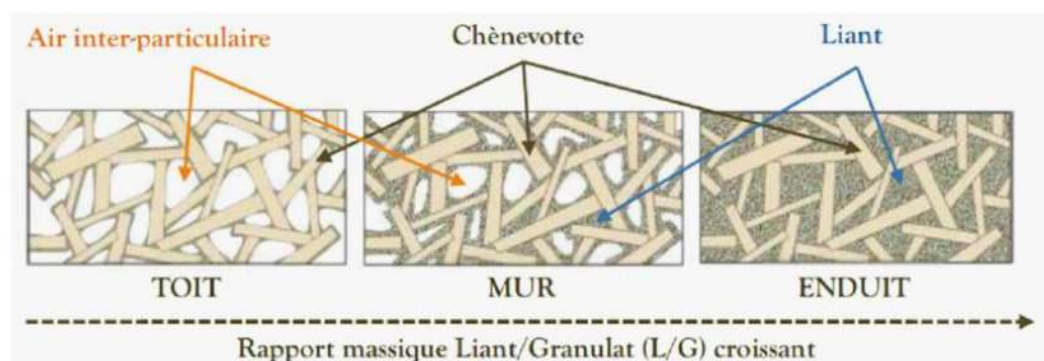


Figure 2 - Applications caractéristiques des mélanges chaux-chanvre proposées par les Règles Professionnelles.

Un des enjeux majeurs est donc de trouver un bon équilibre entre résistance mécanique et conductivité thermique sachant que l'incorporation des granulats végétaux réduit considérablement la conductivité thermique, mais aussi la résistance mécanique.

Dans sa thèse (Magniont, 2010) a démontré que le type de granulat végétal a une influence sur la résistance mécanique du matériau composite. En tenant compte de ces éléments, nous avons développé notre recherche bibliographique en ciblant directement le béton de chanvre. Cependant, une recherche bibliographique de type « tissage de toile » nous a amené à ajouter quelques références sur l'utilisation de fibres végétales.

La sélection des composants et leurs proportions relatives, ainsi que les méthodes de traitement et de mise en œuvre déterminent les propriétés finales des agro-bétons en général et des bétons de chanvre en particulier. Les constituants des bétons de chanvre et les phénomènes liés à leurs interactions sont maintenant présentés ainsi que les propriétés physiques et mécaniques du matériau, principalement celles servant à l'étude de la rénovation hygrothermique des bâtiments.

## 1.2.2 Constituants

### 1.2.2.1 Chènevotte de chanvre

Le chanvre dont le nom scientifique est *cannabis sativa*, est une plante annuelle dioïque de la famille des Cannabacées qui présente multiples voies de valorisation pour tous ses constituants, et qui s'intègre parfaitement dans une dynamique de développement durable (Figure 3), bien au-delà d'être un simple puits de CO<sub>2</sub>.

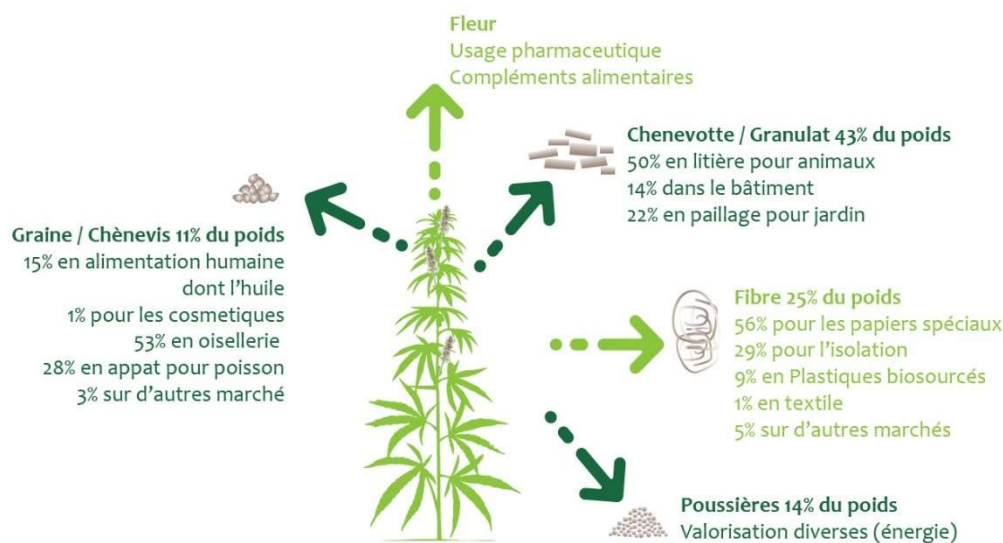


Figure 3 - Les produits du chanvre (Association InterChanvre, 2020). Disponible sur : [www.interchanvre.org](http://www.interchanvre.org).

Elle comprend trois espèces : *Cannabis sativa*-chanvre, *Cannabis indica*-chanvre et *Cannabis ruderalis*-chanvre. Parmi celles-ci, seule la première est destinée à la culture du chanvre industriel et se distingue par une faible teneur en substance psychoactive tétrahydrocannabinol (THC) de moins de 2 % (Nguyen, 2010). La Figure 4 présente l'ensemble des particules de la tige du chanvre.

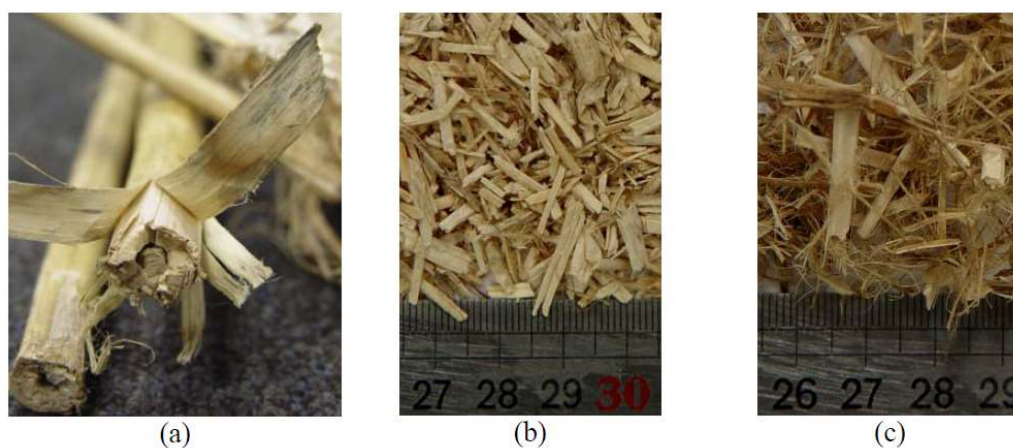


Figure 4 - *Cannabis sativa*. (a) Tige du chanvre. (b) Chènevotte pure. (c) Chènevotte fibrée (Nguyen, 2010).

Les agrégats de chènevotte sont généralement très poreux avec une densité apparente faible et une architecture complexe caractérisée par une porosité à plusieurs échelles comprenant principalement les macropores, les mésopores et les micropores (Collet *et al.*, 2008). Ils se présentent sous la forme de particules parallélépipédiques, de dimensions moyennes  $2 \times 0,5 \times 0,2 \text{ cm}^3$  (Cérézo, 2005) ou  $0,5 \times 1 \times 0,1 \text{ cm}^3$  (Nguyen, 2014), et de porosité élevée, de l'ordre de 78% (Cérézo, 2005).

Ces caractéristiques géométriques se traduisent par une grande capacité de transfert hygrothermique. De plus, la grande flexibilité des granulats conduit à un comportement élastoplastique non fragile et à une grande déformabilité sous contrainte, à l'absence de fracturation et à une ductilité marquée avec absorption des déformations, même après avoir atteint la résistance mécanique maximale (Arnaud et Gourlay, 2012).

Comme dans tous les végétaux, la tige du chanvre possède des capillaires de différentes tailles qui jouent un rôle de transmission de la sève le long de la tige. A l'état sec, ces capillaires sont vides et constituent la plus grande partie de la porosité des particules végétales (Nguyen, 2010). La Figure 5 présente les observations au microscope électronique à balayage (MEB) de la tige du chanvre réalisées par (Nguyen, 2010) selon deux coupes, une transversale et une longitudinale.

Ce sont ces propriétés microstructurales de la chènevotte qui confèrent au béton de chanvre des propriétés hygrothermiques intéressantes pour l'écovénovation et qui seront étudiées au long de ce rapport.

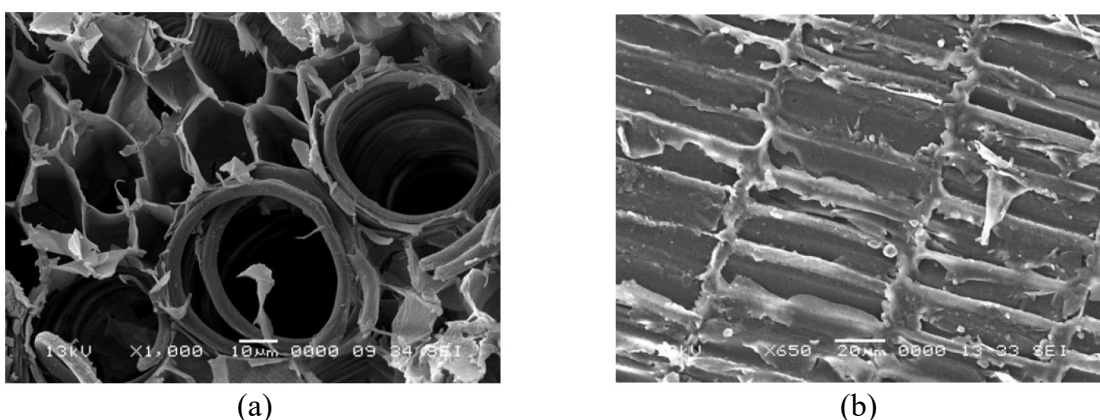


Figure 5 - Microstructure de la tige du chanvre. (a) Observation d'une coupe transversale. (b) Observation d'une coupe longitudinale (Nguyen, 2010).

En termes de constitution chimique, la chènevotte est caractérisée majoritairement de trois composés principaux : lignine, cellulose et hémicellulose mais aussi d'autres composites hydrosolubles, comme les cires, graisses, *etc.* (Magniont, 2010).

#### 1.2.2.2 Liants

En fonction du caractère très capillaire de la chènevotte et de sa propriété hydrophile, le choix du liant à mélanger avec ce granulat est de grande importance mais aussi d'une grande complexité.

Dans le cas du béton de chanvre, le choix du liant doit répondre à trois exigences : d'une part, permettre un malaxage aisé notamment pour obtenir un enrobage parfait des différents constituants, d'autre part, assurer un maintien du comportement à l'état frais permettant une mise en œuvre correcte dans la structure, et, enfin, après la prise et le durcissement, assurer les caractéristiques mécaniques essentielles du matériau (Bouloc, 2006). En raison des caractéristiques écologiques de ce matériau, nous pouvons aussi ajouter que le choix du liant doit permettre une réduction des impacts environnementaux liés à l'industrie de la construction de façon générale, comme décrit par (Amziane et Arnaud, 2013). Pour un usage en réhabilitation des bâtiments anciens, on cherche aussi à obtenir des matériaux à faible conductivité thermique. Pour cette raison il est important de souligner que la conductivité finale du composite reste peu influencée par la conductivité intrinsèque du liant, par rapport au dosage en granulats légers par exemple (voir 1.2.4.2).

Selon (Magniont, 2010), le meilleur moyen de limiter les impacts environnementaux du ciment serait de le substituer au moins en partie par un autre liant ne générant pas ou peu de CO<sub>2</sub> lors de sa production. Dans cette perspective, le choix d'additions pouzzolaniques est courant dans la littérature, ces additions présentant généralement un faible impact environnemental. Parmi les liants alternatifs qui semblent prometteurs, (Gartner, 2004) cite aussi les pouzzolanes activées par des silicates alcalins qui présenteraient un fort potentiel de développement en raison de leur durcissement rapide, de leur résistance élevée et de leur impact environnemental très réduit par rapport au ciment.

Les résultats de (Magniont, 2010) ont montré qu'une matrice pouzzolanique composé de 50% de métakaolin (MK) et de 50% de chaux hydraulique naturelle (NHL5) présente des performances mécaniques qui surpassent largement celles des autres liants dans la littérature. Il est important de noter que les derniers travaux de recherche portant sur le métakaolin (MK),

par exemple, ont préféré l'utilisation du métakaolin provenant d'une calcination flash, dont la consommation d'énergie est 80% inférieure à celle de la production de ciment, les émissions de CO<sub>2</sub> étant aussi inférieures (San Nicolas, 2012).

La nature chimique de la matrice influence également notablement la durabilité du composite. L'utilisation d'une matrice pouzzolanique dans laquelle les espèces les plus mobiles, susceptibles de migrer dans les fibres et d'induire leur minéralisation, sont consommées rapidement (environ 28 jours), serait favorable à la durabilité du composite ce qui est discuté dans la partie 1.2.3.3.

D'autres additions décrites dans la littérature sont les laitiers qui présentent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques et peuvent être activés par des alcalins en général ou la chaux en particulier. Il s'agit donc de liants alcali-activés (de l'anglais *alkali-activated materials* ou AAM) (RILEM TC 244-AAM, 2014). L'inconvénient de ces mélanges est que la cinétique de développement des résistances mécaniques reste toujours lente (Gartner, 2004 ; Magniont, 2010).

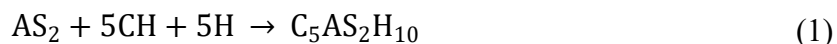
Le laitier granulé de haut-fourneau moulu (GGBFS) est ainsi bien reconnu dans la littérature comme matériau cimentaire complémentaire (*supplementary cementitious material*). Il présente un comportement hydraulique latent entraînant un développement retardé de la résistance au jeune âge, ce qui pénalise son utilisation dans l'industrie du béton préfabriqué pour laquelle la résistance au très jeune âge est un facteur clé pour atteindre une productivité élevée (Korde *et al.*, 2021).

#### a Liants pouzzolaniques

La réaction des mélanges de matériaux pouzzolaniques et de chaux (ou chaux hydraulique naturelle) produit les mêmes composés que ceux que l'on retrouve lors de l'hydratation du ciment Portland, puisque les compositions chimiques sont similaires. Pour cette raison, différents types de matériaux pouzzolaniques produisent des hydrates d'aluminate et de silicate similaires. Les différences sont mineures et, en général, affectent la quantité plutôt que la nature des phases hydratées (McCarthy et Dyer, 2019).

Dans le cadre de cette thèse nous utiliserons un liant composé de métakaolin activé par la chaux (Ca(OH)<sub>2</sub>) selon le mécanisme de réaction d'un composé alcalino-terreux en présence d'un pH élevé (RILEM TC 244-AAM, 2014). Cette réaction pouzzolanique a lieu en solution par des

mécanismes de dissolution/précipitation entre l'hydroxyde de calcium et la silice et l'alumine provenant du métakaolin. L'équation bilan de cette réaction en présence de chaux éteinte (CH) est présentée dans l'équation (1).



Où  $\text{C}_5\text{AS}_2\text{H}_{10}$  représente une composition moyenne des produits de cette réaction qui sont des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et des silico-aluminates de calcium hydratés, en majorité de la gehlénite hydratée ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) et du  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  ainsi qu'éventuellement de l'hydrogrenat ( $\text{C}_3\text{ASH}_6$ ). De plus, en présence de carbonate de calcium dans le mélange, la littérature fait état de formation de carboaluminates (Frías et Cabrera, 2001) et d'hydroxycarboaluminates (Rojas et Sánchez de Rojas, 2003) de calcium hydratés.

La réactivité du métakaolin est influencée par de nombreux facteurs, notamment ses propriétés intrinsèques (composition chimique, minéralogie, taille et morphologie des grains, *etc.*) résultant de la nature du kaolin et des procédés utilisés lors de sa fabrication (Cassagnabère *et al.*, 2009). Elle dépend également du mélange réalisé (substitution d'une partie du ciment ou mélange avec de la chaux, nature de ce ciment, *etc.*) et des conditions de cure qui peuvent influencer les cinétiques de formation et la nature des phases hydratées. Les paramètres prépondérants semblent être le ratio  $\text{AS}_2/\text{CH}$  et la température (Sabir *et al.*, 2001).

## **b Liants alcali-activés**

On constate une certaine difficulté dans la littérature pour le classement/nomenclature des liants composés de laitier et chaux hydraulique naturelle. Pour certains auteurs le produit résultant correspond à un liant alcali-activé (Yang *et al.*, 2012) et pour d'autres à un géopolymère (à noter que parfois ces termes sont utilisés en tant que synonymes). Dans les deux cas le liant est produit à partir du mélange d'un activateur chimique (solution alcaline) avec une source de silicate d'aluminium amorphe (métakaolin, laitier, entre autres). On trouve encore la nomenclature « liant pouzzolanique » (Korde *et al.*, 2021).

Le terme « géopolymère » a été appliqué à une large gamme de liants activés par des alcalis, mais le plus souvent à des systèmes à faible teneur en calcium ou sans calcium dérivés de cendres volantes ou d'argiles. Un débat est actuellement en cours sur la question de savoir si le terme « géopolymère » peut (ou devrait) être appliqué aux systèmes riches en Ca tels que les laitiers activés par des alcalis ; la résolution de cette question semble être principalement basée

sur le marketing (par opposition aux domaines scientifiques) (RILEM TC 244-AAM, 2014) et ne fera pas l'objet d'une discussion plus approfondie ici.

La Figure 6 présente la classification des différents sous-ensembles d'AAMs (*alkali activated materials*). On constate que les liants alcali-activés présentent une teneur en calcium beaucoup plus élevée que celle des géopolymères selon la classification de (RILEM TC 244-AAM, 2014). Dans cette thèse le terme alcali-activé sera désormais utilisé pour désigner nos mélanges entre le laitier (LT) et la chaux hydraulique naturelle (NHL).

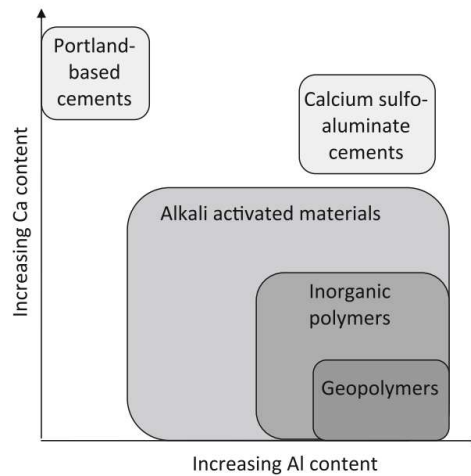


Figure 6 - Classification de différents sous-ensembles d'AAMs, comparaisons avec la chimie des liants Portland et sulfoalumineux. L'ombrage indique la teneur approximative en alcali ; un ombrage plus foncé correspond à des concentrations plus élevées de Na et/ou K selon (Van Deventer *et al.*, 2010).

La structure des hydrates formés par l'activation du laitier de haut fourneau dépend fortement de divers facteurs chimiques qui contrôlent le mécanisme de réaction, et, par conséquent également, le développement de la résistance mécanique et les performances de durabilité. Ces facteurs peuvent être classés en deux grandes catégories : ceux directement liés à l'activateur utilisé, et ceux associés aux caractéristiques des matières premières.

Le mécanisme classique d'hydratation du laitier-ciment (en tant que matériau supplémentaire) dépend principalement de la disponibilité de l'hydroxyde de calcium dans la formation du silicate de calcium hydraté. Dans l'hydratation du ciment Portland, le gel de C-S-H et la formation d'ettringite libèrent de l'hydroxyde de calcium qui aide à maintenir un pH élevé et réagit avec le GGBS dormant pour former une quantité de gel C-S-H ou C-A-S-H

supplémentaire. Dans le cadre de cette thèse, pour obtenir le même effet mais sans utiliser de ciment, nous utiliserons la chaux hydraulique naturelle.

Dans un système composé de laitier activé par un hydroxyde, la matrice liante est dominée par un gel C-A-S-H, avec des phases secondaires riches en Al étroitement mélangées telles que des hydroxydes double lamellaire (ressemblant souvent au groupe hydrotalcite et appelé hydrotalcite-like) et/ou des hydrates de (silico)aluminates de calcium, en fonction principalement de la teneur en Al et Mg du laitier. Le degré d'ordre structural du gel C-A-S-H a tendance à être relativement élevé par rapport à la plupart des produits d'hydratation du ciment Portland. L'équation (2) présente, de façon simplifiée, la réaction d'hydratation du laitier (C-S-A) avec la chaux hydratée (CH).



La Figure 7 présente une représentation schématique des phases formées dans les liants alcali-activés, les produits cristallins étant affichés en vert et les produits amorphes en bleu. Les zéolites sont les principaux produits secondaires cristallins dans les systèmes à faible teneur en Ca et/ou à faible teneur en Mg, tandis que l'hydrotalcite se forme à partir de laitiers riches en Mg et que des phases de type AFm se forment dans la plupart des liants à base de laitier de haut fourneau en présence de suffisamment d'aluminium.

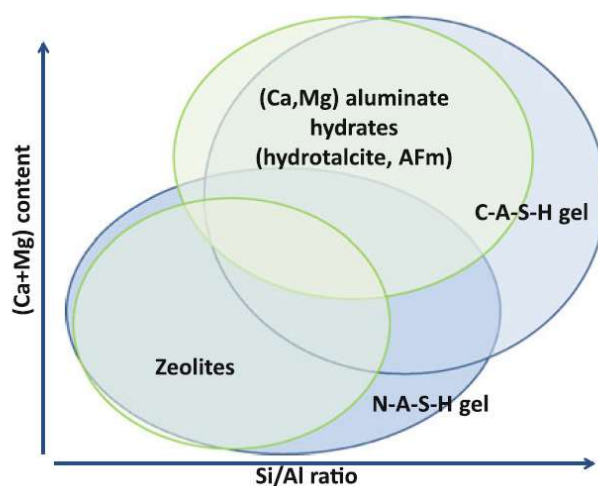


Figure 7 - Représentation schématique de la formation des phases dans les liants alcali-activés ; les produits cristallins sont affichés en vert et les produits vitreux en bleu (Provis, 2014).

A l'image d'un béton de ciment portland traditionnel, le béton de chanvre va présenter un état frais, caractérisé par une fluidité suffisante pour garantir sa mise en forme (moulage, projection), et un état durci induit par l'éventuelle prise du liant minéral utilisé, son durcissement et le séchage, comme discuté dans la suite.

### 1.2.3 Fabrication et mise en œuvre

Les techniques de mise en œuvre du béton de chanvre actuellement utilisées correspondent à des techniques traditionnelles (moulage en coffrage à l'image de la mise en œuvre du béton coffré ou du pisé traditionnel, aussi appelé banchage) ou des techniques reposant sur l'adaptation de procédés plus modernes (vibrocompactage pour fabriquer du bloc constructif et projection *in-situ*). Les solutions techniques varient selon le type d'application du béton de chanvre : en mur (remplissage vertical), en toiture ou en dallage (Amziane et Arnaud, 2013).

Dans tous les cas, il convient d'optimiser la formulation du mélange au regard de la méthode de mise en œuvre et en fonction des objectifs en termes de performance (thermique, hydrique et mécanique) du produit fini.

#### 1.2.3.1 Malaxage

La procédure de malaxage dépend du type de mise en œuvre prévue. Il est important de bien choisir la façon de mélanger les composants car elle va aussi conditionner la structure de l'air dans le béton de chanvre, présent dans la porosité de la chènevotte ou sous forme de porosité dans la pâte minérale (Amziane et Arnaud, 2013).

Les mélanges sont effectués soit à la bétonnière, soit dans un malaxeur à béton. Dans le premier cas, la littérature recommande de former d'abord une pâte avec le liant et toute l'eau puis d'introduire progressivement la chènevotte. Le temps de malaxage doit être contrôlé afin d'éviter la formation de boulettes de chènevotte caractéristique d'une démixtion (phénomène plus courant en présence de chènevotte fibrée) ou par un entraînement d'air trop important. L'effet de moussage introduit une fluidité remarquable au béton de chanvre frais ; cependant, des tassements sous poids propre importants sont constatés à la mise en œuvre.

Pour les mélanges effectués dans un malaxeur à béton, un mélange à sec de la chènevotte et du liant est possible grâce à l'énergie de malaxage supérieure. Ce type de malaxage permet d'obtenir des bétons uniformes contenant relativement peu d'eau qui sera ajoutée par aspersion.

Dans le cas des bétons moulés, le compactage est préconisé afin de garantir une bonne cohésion. Un temps de process court est recommandé afin d'éviter l'absorption d'eau par la chènevotte.

### 1.2.3.2 Temps de séchage

Les courbes de pertes de masse trouvées dans la littérature mettent en évidence deux cinétiques de séchage avec tout d'abord des pertes de masse importantes sur une durée pouvant aller jusqu'à 28 ou 60 jours (en fonction des études), puis une cinétique qui ralentit beaucoup avec des pertes de masse plus faibles, comme présenté sur la Figure 8.

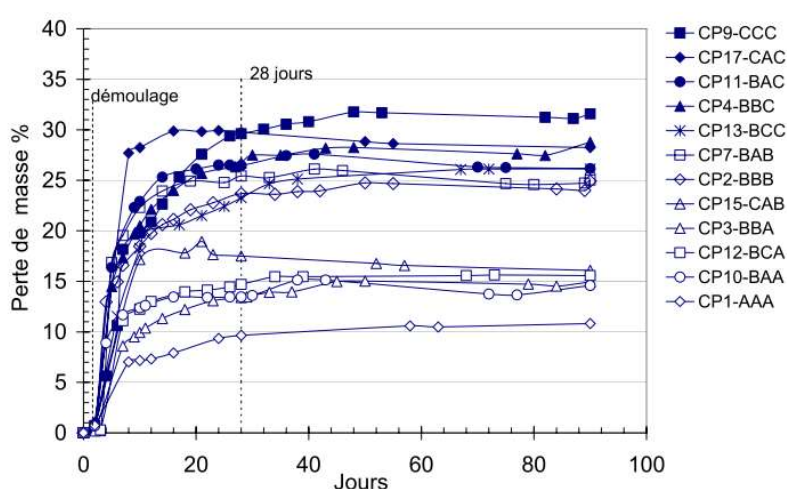


Figure 8 - Cinétique de perte de masse des éprouvettes confectionnées par (Nguyen, 2010).

Lorsque la masse n'évolue plus de façon significative, on atteint un état que l'on peut qualifier de « sec » pour le matériau et la durée écoulée est appelée « temps de séchage ». Les cinétiques de séchage et le temps de séchage peuvent dépendre de différents paramètres tels que les conditions externes ou encore les paramètres intrinsèques au béton de chanvre (porosité, perméabilité, nature des matières premières, mode de fabrication, *etc.*). Ainsi, une force de compactage plus élevée va réduire la porosité, et, de la sorte, ralentir le processus de séchage (Hustache et Arnaud, 2008).

Dans sa thèse, (Magniont, 2010) cite différentes techniques de mise en œuvre pour réduire le temps de séchage du béton de chanvre :

- Projection : la technique de projection par voie sèche consiste au prémélange à sec des constituants (chènevotte et liant) puis à la pulvérisation au niveau de la lance de projection d'une quantité d'eau réduite. Ainsi, le temps n'est pas laissé à la chènevotte d'absorber l'eau de gâchage et la quantité d'eau introduite peut être proche de celle nécessaire à l'hydratation du liant (Elfordy *et al.*, 2008).
- Préfabrication : ce procédé limite la manipulation sur chantier à des produits secs et légers, il n'y a pas recours au coffrage ou à d'autres techniques nécessitant des compétences particulières. Son application semble donc aisée y compris par une main d'œuvre non qualifiée et donc particulièrement adaptée à l'autoconstruction (Magniont, 2010 ; Liu *et al.*, 2017).

Des techniques décrites pour l'amélioration de la durabilité (modification de la matrice et des fibres/granulats) et aussi la technique de prétraitement de fibres/granulats végétaux décrite ci-après (item 1.2.3.4) peuvent être aussi considérées comme des techniques efficaces pour réduire le temps de séchage du béton de chanvre vu qu'elles permettent une réduction de l'absorption d'eau pour les granulats végétaux.

Dans ce sens, plusieurs auteurs ont aussi ajouté les adjuvants réducteurs d'eau et superplastifiants au mélange (Magniont, 2010 ; Nozahic, 2012 ; The Manh, 2014 ; Lau Hiu Hoong, 2017) mais les résultats n'ont pas encore suffisamment réduit l'absorption d'eau : les résistances mécaniques obtenues jusqu'à présent sont encore faibles et le temps de séchage reste élevé (Magniont *et al.*, 2012).

### 1.2.3.3 Interactions entre granulat végétal et liant

Les premières études de durabilité des composites cimentaires incorporant les matériaux végétaux ont été menées sur les fibres végétales, et ce n'est que plus récemment que le béton de chanvre a retenu l'attention des scientifiques. Cependant, comme les constitutions chimiques des fibres et des granulats végétaux sont proches, nous allons présenter ci-après une synthèse sur le comportement de ces deux constituants (fibres et granulats) en milieu alcalin.

Des études antérieures ont souligné la grande sensibilité à l'eau du chanvre en raison de sa très haute porosité. Ce comportement pourrait poser des problèmes car, au moment de la fabrication du béton de chanvre lorsque les composants anhydres et l'eau sont mélangés, les particules de chanvre absorbent et retiennent une grande quantité d'eau qui n'est donc plus disponible pour

l'hydratation du liant (Pacheco-Torgal et Jalali, 2011). D'autre part, d'après l'étude de (Peyratout *et al.*, 2007), il semble que l'introduction des fibres dans une matrice de chaux hydraulique retarde le début du temps de prise d'environ 60 min, et augmente la durée de prise de 20 min.

Dans sa thèse, (Magniont, 2010) a observé la microstructure de fibres de chanvre suite à l'immersion durant 3 mois dans une solution saturée de chaux. L'effet de l'immersion dans la solution d'hydroxyde de calcium est présenté sur la Figure 9 ci-après.

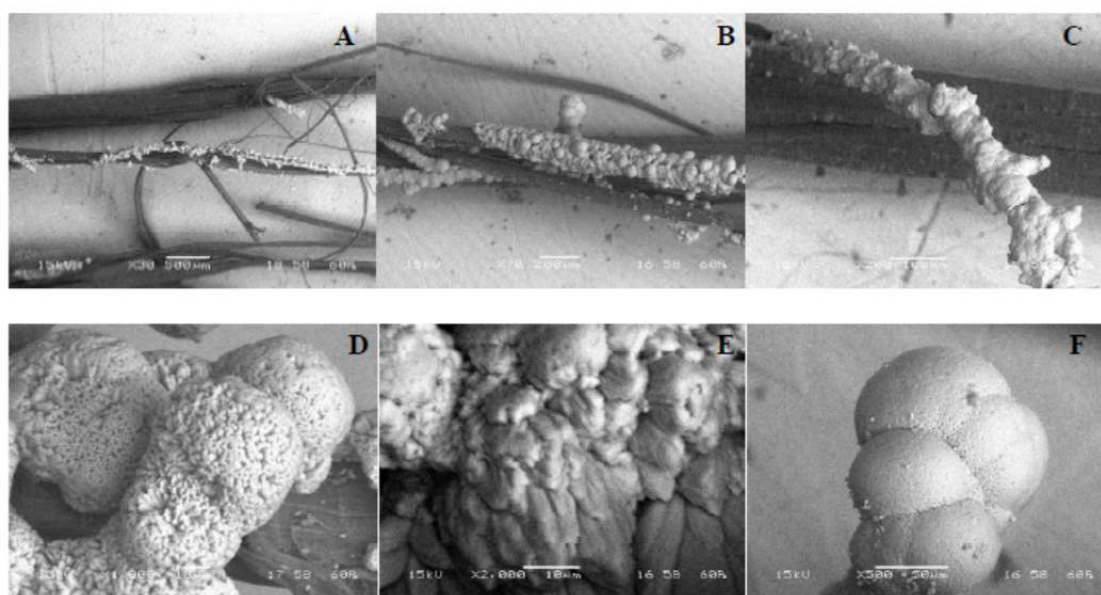


Figure 9 - Cliché MEB des fibres de chanvre après 3 mois d'immersion dans une solution saturée de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . (A : x 30 ; B : x 70 ; C : x 200 ; D : x 1000 ; E : x 2000 ; F : x 500) (Magniont, 2010).

On observe qu'après l'immersion dans la solution d'hydroxyde de calcium saturé, des phases minérales précipitées apparaissent à la surface des fibres de chanvre. L'auteur a confirmé la nature calcique de ces formes cristallisées par l'analyse EDS. Ce phénomène de précipitation de calcite et de pénétration des produits d'hydratation dans les pores ou le lumen de la chènevotte est appelé minéralisation (Sedan *et al.*, 2008).

Selon l'auteur, il existerait une affinité particulière de ces fibres avec les ions calcium, résultat également observé par (Sedan, 2007) qui attribue cette affinité à la présence de pectines. Pourtant, ce composé n'est pas détecté par ATG (thermogravimétrie) dans les fibres de chanvre utilisées dans l'étude en question et la bibliographie est relativement contradictoire à ce sujet.

D'après (Magniont, 2010), la couche formée autour des fibres de chanvre correspondrait à une zone de transition riche en calcium, générée par l'affinité chimique particulière de ces fibres avec les ions calcium et/ou par la mobilité importante de ces espèces ioniques en solution combinée au fort pouvoir absorbant des fibres. Il ne s'agirait pas de minéralisation en profondeur mais d'une forte liaison entre les fibres et ces hydrates qui pénètrent la couche superficielle des fibres.

Des études récentes ont exploré différentes manières de réduire les interactions entre liant et granulat végétal : modification de la nature du liant (Magniont, 2010 ; Nozahic, 2012), compactage ou vibrocompactage du mélange frais (Nguyen *et al.*, 2014 ; Lau Hiu Hoong, 2017), fabrication du matériau par projection (Elfordy *et al.*, 2008) ou revêtement d'agrégats végétaux avant leur incorporation dans le liant, méthode aussi appelé de prétraitement (Khazma *et al.*, 2012 ; Magniont *et al.*, 2012), comme présenté ci-après.

#### 1.2.3.4 Prétraitement des granulats végétaux

La valeur typique d'absorption d'eau des granulats végétaux est d'environ 350% massique (Amziane et Sonebi, 2016). Une façon de la réduire (et par conséquent améliorer la durabilité, la résistance mécanique et aussi réduire le temps de séchage du béton de chanvre) est d'utiliser la méthode développée par (The Manh, 2014) qui consiste à pré-mélanger la chènevotte avec une partie du liant et une partie de l'eau et de laisser ensuite le mélange à l'air libre (en couche de 5 cm d'épaisseur environ pour favoriser le séchage du mélange) pendant 48 heures au minimum. Les chènevottes prétraitées sont ensuite mélangées à l'eau et au liant restant avant de mettre en œuvre le béton de chanvre. L'auteur a constaté que, comparée aux chènevottes non traitées, les chènevottes prétraitées absorbaient 65% moins d'eau pendant la première minute et 27% moins après les 48 heures, comme le montre la Figure 10 ci-après.

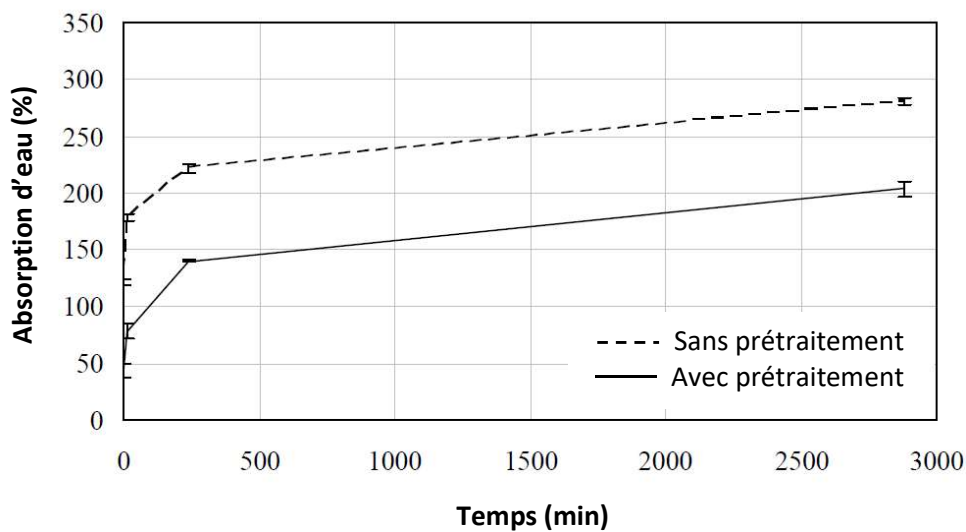


Figure 10 - Absorption d'eau des granulats de chanvre (avec et sans prétraitement) en fonction du temps (The Manh, 2014).

En plus, (Davidovits, 2013) affirme que le prétraitement à base d'alcali et de silice des granulats végétaux augmente la résistance à l'humidité du matériau. Selon l'auteur, le traitement alcalin permet une augmentation de la résistance à la compression des biomatériaux jusqu'à deux fois et une diminution de l'absorption d'eau jusqu'à 1,6 fois.

## 1.2.4 Propriétés

### 1.2.4.1 Comportement mécanique

En général, le béton de chanvre possède un comportement élastoplastique avec des déformations plastiques présentes dès les faibles niveaux de sollicitation. Le matériau ne présente pas de rupture fragile marquée et il est susceptible de subir des fortes déformations sans rupture brutale. De plus, lors des essais à la compression et une fois la charge ultime atteinte, ce matériau se déforme encore beaucoup tout en résistant à des charges relativement élevées (Cérézo, 2005 ; Nguyen, 2010).

#### a Influence de la formulation

Le comportement mécanique du béton de chanvre dépend de la proportion de ses constituants (granulats végétaux et liant). Pour un faible dosage en liant (concentration volumique de 10%), le béton de chanvre se comporte comme un empilement de particules compressibles. Le

matériau possède une faible résistance en compression et aussi un faible module d'élasticité. Par contre, sa capacité de déformation est très importante (supérieure à 15%) (Nguyen, 2010).

Actuellement, en France, pour faciliter l'utilisation du béton de chanvre, quatre types de mélange sont définis en faisant principalement varier le dosage en liant. Leurs dénominations reflètent l'usage pour lequel ils sont le plus couramment utilisés, à savoir « Toit », « Sol », « Mur », « Enduit » comme montré sur la Figure 11. Leur composition, et leur mise en œuvre sont présentées d'une manière détaillée dans les règles professionnelles d'exécution du béton de chanvre (Construire en chanvre, 2012).

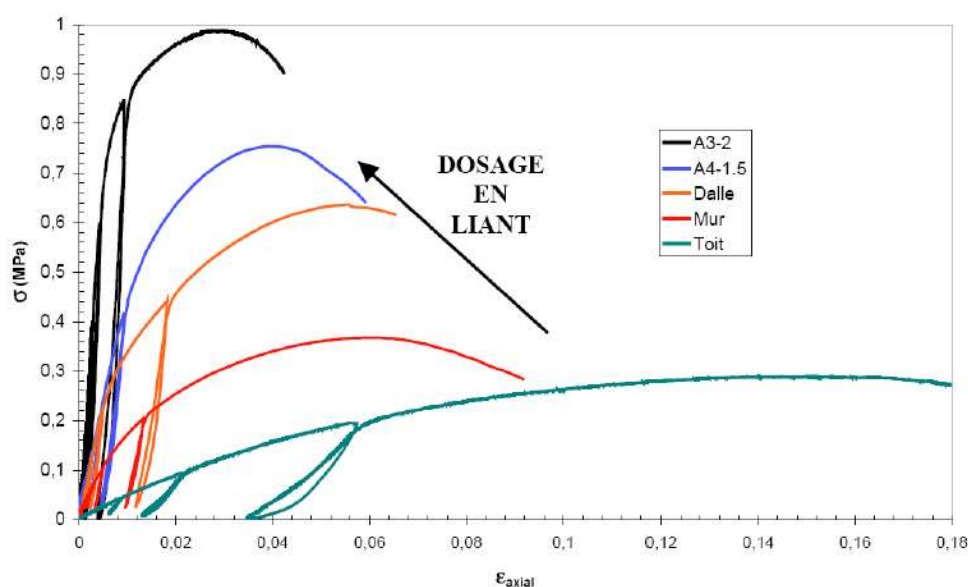


Figure 11 - Comportement mécanique en compression du béton de chanvre à différents dosages en liant (Cérézo, 2005)

D'après (Cérézo, 2005), pour un dosage en liant compris entre 19 et 29% en volume, les particules de chènevotte sont enrobées par une couche du liant d'épaisseur plus ou moins grande. La performance mécanique augmente avec la quantité du liant, la densité des hydrates augmente et impose le comportement global. Pour un fort dosage en liant (concentration volumique d'environ 40%), le comportement est similaire à celui d'une matrice du liant continue dans laquelle des particules végétales sont noyées, la performance mécanique augmente et tend vers celle du liant pur.

Actuellement, la plupart des bétons de chanvre coulés avec une matrice pouzzolanique ont une résistance à la compression d'environ 1 MPa (des résistances mécaniques supérieures ont déjà

été obtenues par vibrocompactage ou utilisation des liants différents, comme nous le verrons plus tard). Cette valeur est faible si on la compare avec celle d'un béton cellulaire autoclavé, béton léger utilisé pour ses propriétés d'isolation thermique et dont la résistance à compression est d'au moins 3 MPa (Fatre, 2013), ou avec celle d'un bloc béton ordinaire (béton « B40 » de résistance à la compression minimale de 4 MPa). Il conviendrait donc d'obtenir au moins 3 MPa pour élargir le champ d'application du béton de chanvre (Lau Hiu Hoong, 2017).

D'autres techniques pour augmenter la résistance mécanique ont été mises en place comme par exemple l'incorporation de sable effectué par (Magniont, 2010). L'auteur a conclu que le gain de performance par substitution du sable à une partie de la chènevotte reste limité tandis que la conductivité thermique des composites augmente avec le dosage en sable, c'est-à-dire, avec leur masse volumique (ce sujet sera abordé dans l'item 1.2.4.2). La substitution d'une partie des granulats végétaux par du sable ne semble donc pas une bonne alternative pour atteindre à la fois les propriétés mécaniques plus élevées et des propriétés thermiques satisfaisantes.

### b Influence du compactage

Plusieurs auteurs ont cherché à améliorer la performance mécanique du composite par une modification du mode de production avec une mise en place par vibrocompactage (Magniont, 2010 ; The Manh, 2014 ; Lau Hiu Hoong, 2017) qui est aussi plus reproductible.

D'autres sont allés plus loin en maintenant le compactage pendant la prise du matériau. Ainsi, (Nguyen *et al.*, 2009) ont montré que le maintien du compactage engendrait des gains de résistance en compression ou de module d'Young nettement plus importants au regard de l'augmentation de la conductivité thermique du matériau. Les résistances étaient doublées ou triplées tandis que l'augmentation de la conductivité thermique n'excédait pas 40%. Cette constatation est très importante et souligne l'intérêt du compactage sur les performances globales du béton de chanvre utilisé en matériau de construction. Cependant, le maintien du compactage pendant des durées importantes (plusieurs jours) est difficile à concevoir économiquement du point de vue industriel.

### c Influence de la conservation

(Magniont, 2010) a observé que le niveau de performance des échantillons de béton de chanvre conservés en extérieur était assez largement supérieur à celui des échantillons conservés à humidité relative contrôlée, et ce, dès l'échéance de 3 mois. Plusieurs facteurs pourraient expliquer cette différence. Selon l'auteur, la carbonatation des éprouvettes pourrait avoir une

influence positive sur leurs performances mécaniques ; cependant, les suivis de carbonatation réalisés n'ont pas permis de conclure à une différence nette de cinétique de carbonatation entre les deux modes de conservation (à partir de 6 mois, tous les échantillons étaient entièrement carbonatés).

#### d Relation résistance mécanique / masse volumique

On observe généralement que la résistance mécanique est liée à la masse volumique du béton de chanvre (Magniont, 2010 ; Niyigena et al., 2016 ; Lau Hiu Hoong, 2017). La Figure 12 présente les résultats de nombreuses formulations de bétons de chanvre testées par différents auteurs. Les résultats présentés dépendent des formulations, des modes de mise en œuvre du matériau à l'état frais, de l'âge des matériaux au moment des essais et de leurs conservations, c'est pour cette raison que ces résultats doivent être comparés avec prudence.

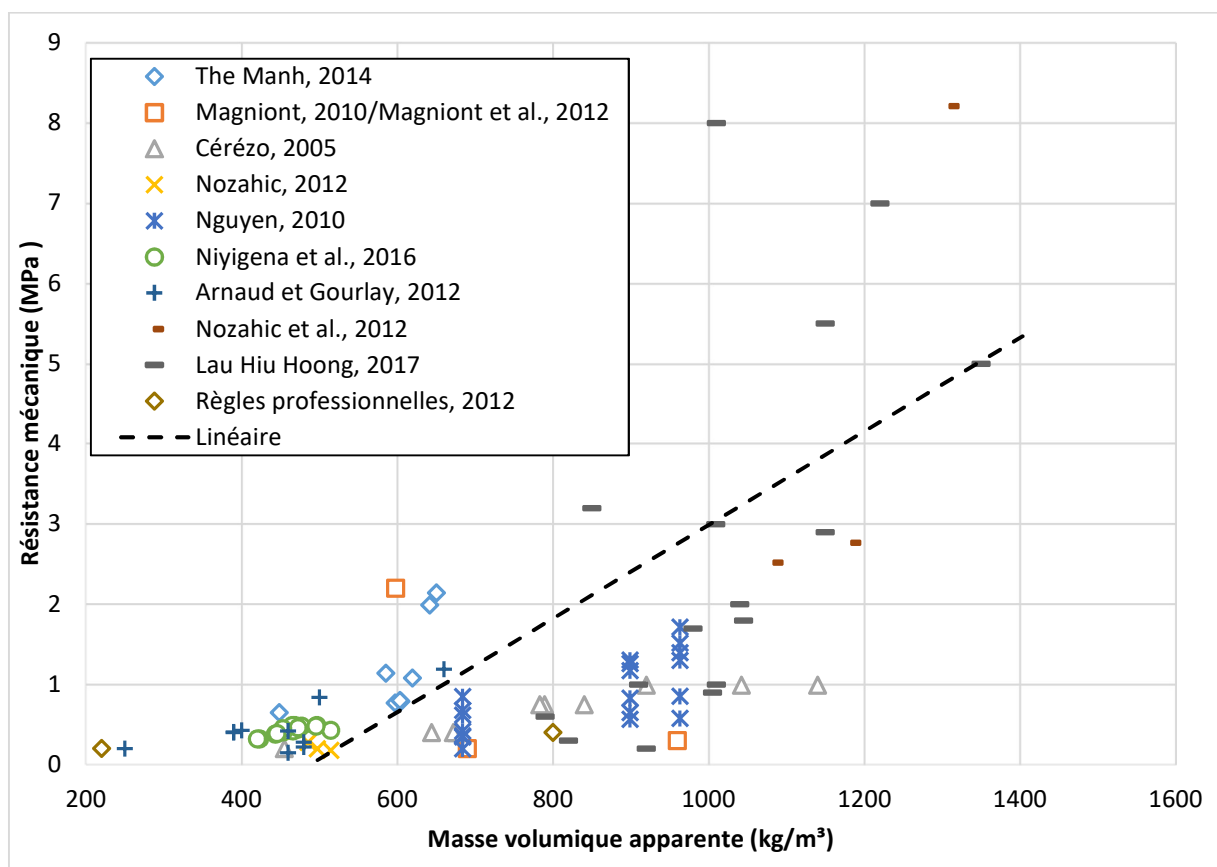


Figure 12 - Variation de la résistance à la compression du béton de chanvre avec la masse volumique apparente sèche dans la littérature.

Les résultats les plus remarquables présentés sur cette figure sont ceux obtenus par (Nozahic *et al.*, 2012) et (Lau Hiu Hoong, 2017) qui dépassent largement le seuil de 3 MPa (et 1000 kg/m<sup>3</sup>).

Les bétons de chanvre coulés par (Nozahic, 2012) présentent des densités sèches élevées car ils ont été obtenus en utilisant le sable de ponce avec de la chaux en tant que liant. De plus, le compactage appliqué pendant le coulage a été maintenu pendant 48 heures avant le démoulage. Il a été noté que l'augmentation de la contrainte de compactage de 2 MPa à 5 MPa ne conduisait qu'à une augmentation de 6,9% de la densité sèche mais à une augmentation de 154% de la résistance à la compression après 14 jours.

Les formulations testées par (Lau Hiu Hoong, 2017) correspondent à un béton de chanvre qui a été coulé à l'aide d'une formulation de type béton fibré à ultra-haute performance (UHPFRC) utilisant le ciment CEM I et le métakaolin en tant que liant, avec un dosage élevé en superplastifiant.

#### 1.2.4.2 Comportement thermique

Le béton de chanvre présente des caractéristiques thermiques et hydriques spécifiques qui lui permettent d'amortir les effets des variations climatiques journalières et d'atténuer les variations soudaines de température et d'hygrométrie (Evrard, 2008 ; Magniont, 2010). C'est pour cette raison qu'on observe son utilisation récente pour la rénovation thermique des bâtiments anciens (Claude, 2018).

Plusieurs paramètres vont conditionner les propriétés thermiques et hydriques du béton de chanvre durci (voir item 1.2.4.3), à savoir les proportions des constituants (liant, chènevotte et eau), le type de chènevotte et la mise en œuvre du béton. Il est difficile d'établir des règles de formulation sur la base de ces critères mais on peut constater que la masse volumique apparente sèche du béton de chanvre constitue un paramètre efficace pour retraduire la variation de propriétés telles que la conductivité thermique (Lau Hiu Hoong, 2017) comme on peut le voir sur la Figure 13.

Les résultats présentés dans cette figure montrent que globalement la conductivité thermique des bétons de chanvre augmente avec la densité apparente sèche et diminue par conséquent avec la proportion d'agréats inclus. On constate toutefois quelques différences selon les auteurs que l'on peut attribuer à des différences de technique de coulage, de nature des agrégats ou des liants (Magniont, 2010 ; Amziane et Sonebi, 2016 ; Hussain *et al.*, 2019).

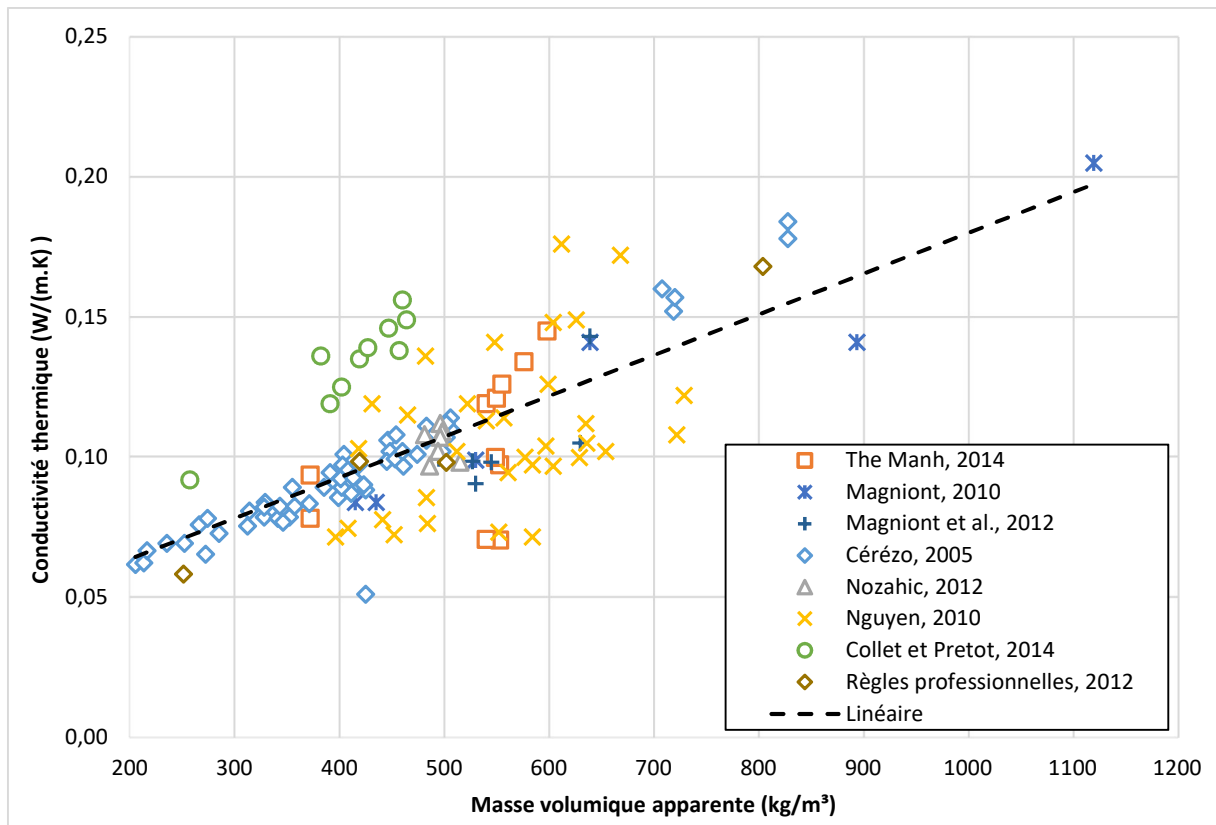


Figure 13 - Variation de la conductivité thermique du béton de chanvre avec la densité sèche dans la littérature.

D'après (Collet et Pretot, 2014), la conductivité thermique des bétons de chanvre varie de 0,09 à 0,16 W/(m.K) à 23°C et 50% HR et l'impact de la densité sur la conductivité thermique est beaucoup plus important que celui de la teneur en humidité. La conductivité thermique augmente ainsi d'environ 54% lors que la densité augmente de 2/3 alors qu'elle n'augmente que de 15 à 20% de l'état sec à un état à 90% d'HR.

#### 1.2.4.3 Comportement hydrique

En tant que matériau poreux de porosité ouverte, le béton de chanvre a la propriété de fixer l'humidité de l'air environnant. Une augmentation de l'humidité de l'air au voisinage de ce matériau entraîne une augmentation de sa masse apparente. Cette augmentation de masse apparente est due à la fixation de molécules d'eau en surface du matériau : c'est le phénomène d'adsorption. Inversement, une diminution de l'humidité de l'air environnant entraîne une diminution de la masse apparente : c'est le phénomène de désorption (Collet, 2004).

Ces bétons peuvent ainsi être considérés comme des matériaux à changement de phase : le comportement thermique réduit l'amplitude des variations de la température de l'air ambiant

tout en améliorant le confort thermique en réduisant la température de surface du matériau. Ainsi, l'utilisation de tels matériaux est un excellent moyen de réguler passivement la température intérieure et de réduire ainsi les besoins énergétiques du bâtiment (Seng, 2018).

Les résultats expérimentaux en laboratoire montrent une régulation de l'humidité relative dans l'enveloppe en raison d'échanges constants de vapeur d'eau entre les environnements intérieur et extérieur, modulant les changements brusques de température. Ainsi, ces matériaux peuvent améliorer le confort d'été et d'hiver, et stabiliser la température intérieure entre le jour et la nuit, tout en évitant les phénomènes de condensation et d'humidité sur les murs (Amziane et Sonebi, 2016 ; Claude, 2018).

L'application de matériaux biosourcés en intérieur comme isolant permet de garder une perméabilité de la paroi et d'agir comme un tampon hydrique (Lawrence *et al.*, 2013). Cette capacité de tampon hydrique, en adsorbant et désorbant la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant, régule l'humidité intérieure et améliore la sensation de confort ainsi que la qualité de l'air (Padfield, 1998). D'après (Claude, 2018), le test de la capacité de tampon hydrique (*Moisture Buffer Value*) réalisé sous sollicitations dynamiques, peu utilisé jusqu'à présent sur les matériaux de construction courants, se révèle une façon de valoriser le caractère hygroscopique des matériaux biosourcés et donc leur performance hygrothermique.

La capacité des matériaux biosourcés à pouvoir échanger de l'humidité avec l'air environnant se traduit par l'isotherme de sorption (courbes de sorption et de désorption) illustrée Figure 14. Le matériau doit alors être considéré comme un ensemble de trois phases : la phase solide, la phase liquide, correspondant à la vapeur adsorbée en surface du matériau, et la phase gazeuse au sein des pores, où la vapeur d'eau et l'air sont à l'équilibre (Claude, 2018).

L'écart observé entre les deux courbes correspond au phénomène d'hystérésis, fréquent pour les matériaux biosourcés. Il est souvent expliqué par le fait qu'il est plus facile pour l'eau de rentrer dans le réseau poreux que d'en sortir du fait des forces capillaires, notamment en cas de la présence de pores en forme de bouteille d'encre, comme expliqué plus en détail par la suite (Claude, 2018).

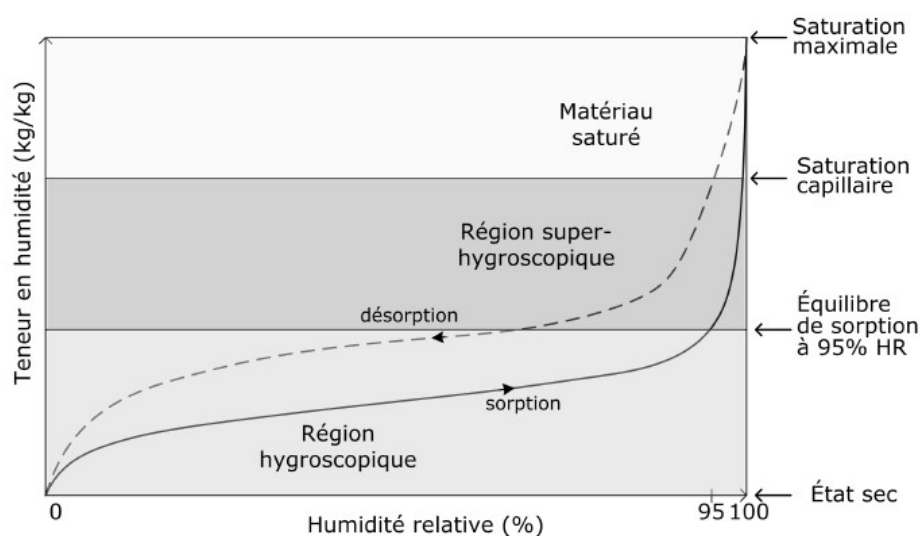


Figure 14 - Forme générale de la courbe de sorption-désorption d'un matériau hygroscopique (Piot, 2009).

La température influençant la teneur en eau du matériau, les courbes de sorption-désorption sont tracées à température constante. En effet, une augmentation de la température produit une diminution de la quantité d'eau adsorbée physiquement en raison du caractère exothermique du phénomène d'adsorption et aussi une augmentation, au niveau des pores, du seuil de condensation capillaire, ce qui provoque, pour une humidité relative donnée, une diminution de la teneur en eau. Ces deux effets allant dans le même sens, une augmentation de la température entraîne donc, pour une humidité relative donnée, une diminution de la teneur en eau (Collet, 2004).

La littérature révèle la forte hétérogénéité des mélanges chaux-chanvre qui se reflète dans les écarts-types élevés obtenus sur les résultats de caractérisation du matériau notamment sur la perméabilité à la vapeur rendant difficile l'obtention de valeurs permettant de définir précisément la performance hygrothermique d'un matériau (Claude, 2018). L'hétérogénéité du matériau peut découler de sa mise en œuvre, par exemple, pour le béton de chanvre appliqué par projection, les premières particules projetées ayant tendance à être plus compactées que les dernières (Pierre et Colinart, 2011). De plus, selon la technique utilisée, une orientation privilégiée des fibres peut apparaître dans le matériau.

Le béton de chanvre a également été caractérisé par une méthode dynamique confirmant que ce matériau est un excellent régulateur hydrique (Collet et Pretot, 2012). Le comportement hygrothermique du béton de chanvre a aussi été étudié à échelle réelle (échelle 1), comme dans

les travaux de (Claude, 2018) par exemple qui a montré que des flux de chaleur et d'humidité simultanés peuvent entraîner d'importantes variations de la pression de vapeur dans la paroi, liées aux phénomènes de sorption.

#### 1.2.4.4 Durabilité

La durabilité des composites de ciment renforcés par des granulats végétaux est liée à leur capacité à résister aux dommages externes (variations de température et d'humidité, attaques par les sulfates ou les chlorures, attaques par les rongeurs et insectes, *etc.*) et aux dommages internes (compatibilité entre les agrégats et la matrice de ciment, modifications volumétriques, *etc.*). Ainsi, selon (Gram, 1983), la dégradation des fibres naturelles absorbées dans le ciment Portland est due au milieu fortement alcalin qui dissout les phases lignine et hémicellulose, affaiblissant ainsi la structure de la fibre.

Selon (Pacheco-Torgal et Jalali, 2011), afin d'améliorer la durabilité des composites de ciment renforcés de fibres, les deux voies suivantes peuvent être investiguées :

- **Modification de la matrice** : c'est à dire, utilisation de béton faiblement alcalin obtenu en ajoutant des sous-produits pouzzolaniques au ciment Portland comme la cendre de balle de riz ou la cendre volante ou encore l'utilisation de pouzzolanes activées par des silicates alcalins (comme indiqué dans 1.2.2.2). Les résultats montrent que l'utilisation de mélanges ternaires contenant du laitier/métakaolin et de la fumée de silice est efficace pour prévenir la dégradation des fibres (Mohr *et al.*, 2007). Mais dans certains cas, en fonction de la nature des fibres, la faible alcalinité n'est pas suffisante pour empêcher la décomposition de la lignine (John *et al.*, 2005). De plus, une carbonatation rapide peut induire une alcalinité inférieure (Agopyan *et al.*, 2005 ; Lau Hiu Hoong, 2017). Ceci est confirmé par d'autres auteurs comme (Tonoli *et al.*, 2010) qui utilisaient la carbonatation artificielle afin d'obtenir du  $\text{CaCO}_3$  à partir de  $\text{Ca(OH)}_2$ , ce qui conduisait à une résistance croissante et à une absorption d'eau réduite. (D'Almeida *et al.*, 2009) ont utilisé des mélanges dans lesquels 50% du ciment Portland étaient remplacés par du métakaolin, produisant une matrice totalement exempte d'hydroxyde de calcium empêchant la migration de l'hydroxyde de calcium vers la fibre, la lamelle moyenne et les parois cellulaires, évitant ainsi le comportement de fragilisation.

- **Modification de la fibre/granulat végétal** : une façon d'éviter l'absorption d'eau et d'alcalins libres est d'enduire les fibres naturelles au moyen de l'utilisation d'agents hydrofuges ou d'imprégner les fibres avec un traitement alcalin (Sedan *et al.*, 2008). L'utilisation de composés organiques tels que les huiles végétales a permis de réduire le processus de fragilisation, mais pas entièrement (Pimentel *et al.*, 2006).

Dans cette partie nous avons présenté le béton de chanvre et ses constituants. Les différents facteurs influençant les propriétés finales du matériau (ses constituants, les procédures de fabrication et de mise en œuvre) ont été discutés. Les comportements thermique et hydrique au niveau macroscopique et la capacité à réguler passivement l'ambiance ont été mis en évidence. Ces comportements sont le résultat d'une série de phénomènes de transport de fluides à l'intérieur du béton de chanvre au niveau microscopique qui seront présentés dans la partie suivante.

### 1.3 Transferts en milieux poreux

En tant que matériau hygroscopique, le béton de chanvre peut réguler l'humidité relative de l'air par adsorption et désorption de vapeur d'eau. Il est le siège de transferts de chaleur et d'humidité, les transferts hygrothermiques. La maîtrise de ces phénomènes impacte la consommation énergétique, le confort et la qualité de l'air intérieure ainsi que la durabilité des parois concernés (Seng, 2018).

Un béton végétal peut être considéré comme un milieu poreux non saturé constitué de trois phases à savoir une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse tel que représenté Figure 15.

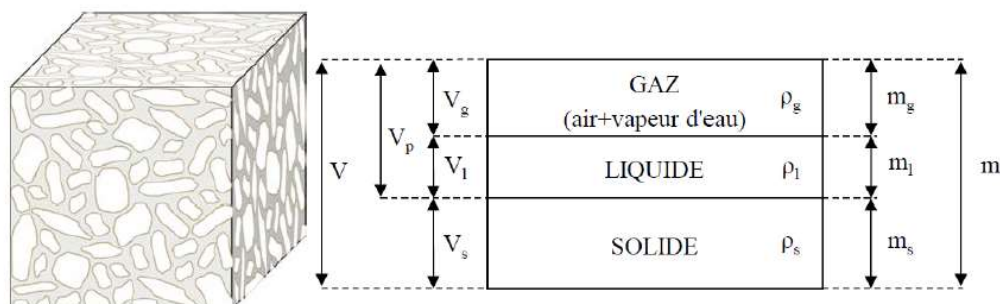


Figure 15 - Phases constitutives d'un milieu poreux non saturé (Collet, 2004).

Les phases liquide et gazeuse se transportent à travers le réseau poreux du matériau, comme illustré en Figure 16. Celui-ci est constitué de différents types de pores. Les pores interconnectés (au moins deux ouvertures) forment un espace continu dans le réseau poreux et participent au transport de matière à travers le milieu. Les pores aveugles, ou bras morts (une seule ouverture), peuvent quant à eux être accessibles mais ne participent pas au transport. Enfin, les pores isolés sont inaccessibles. Les pores interconnectés et aveugles constituent la porosité ouverte du milieu. Les autres réseaux qui n'ont pas d'ouverture avec l'extérieur, ou les pores qui sont isolés, définissent la porosité fermée. Ils peuvent avoir une forme cylindrique, d'entonnoir, de bouteille d'encre (col étroit et corps large) ou de microfissures (Collet, 2004).

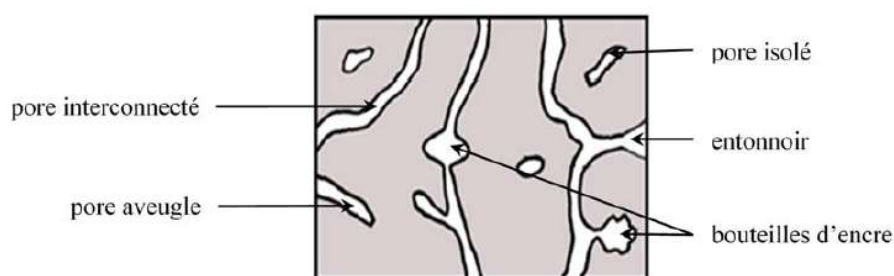


Figure 16 - Schématisation du réseau poreux d'un matériau (Collet, 2004).

Sous l'influence de gradients de différents potentiels (pression de vapeur, pression totale, température, *etc.*), l'eau présente dans le milieu poreux et la chaleur sont susceptibles de se déplacer. Les transferts d'humidité sont décrits à partir de la loi de Fick pour les transferts de vapeur et à partir de la loi de Darcy pour ceux d'eau liquide (Amziane et Arnaud, 2013). Dans la suite nous présentons une description rapide des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux. Il est important de souligner que les deux types de transferts seront présentés séparément, mais ils ont bien sûr un impact l'un sur l'autre, on parle communément de « transferts couplés ».

### 1.3.1 Stockage et transport de l'humidité

Grâce à leur réseau poreux ouvert et la diversité des familles de vides qui les composent, les agro-bétons présentent une capacité très importante à échanger la vapeur d'eau avec l'air environnant. Lorsque l'hygrométrie de l'air est élevée, la vapeur d'eau peut se condenser sous forme d'eau liquide et se fixer à la surface des pores. Les transferts hygrothermiques se réalisent donc au sein du matériau et entre le matériau et son environnement.

L'échange d'humidité entre un matériau et l'air ambiant est décrit par la courbe de sorption dont un exemple est visible sur la Figure 17. Lorsque l'humidité relative de l'air ambiant augmente, la masse apparente du matériau augmente, et inversement lorsque l'humidité relative de l'air diminue. Cette courbe relie donc la teneur en eau du matériau à l'humidité relative en situation d'équilibre (Seng, 2018).

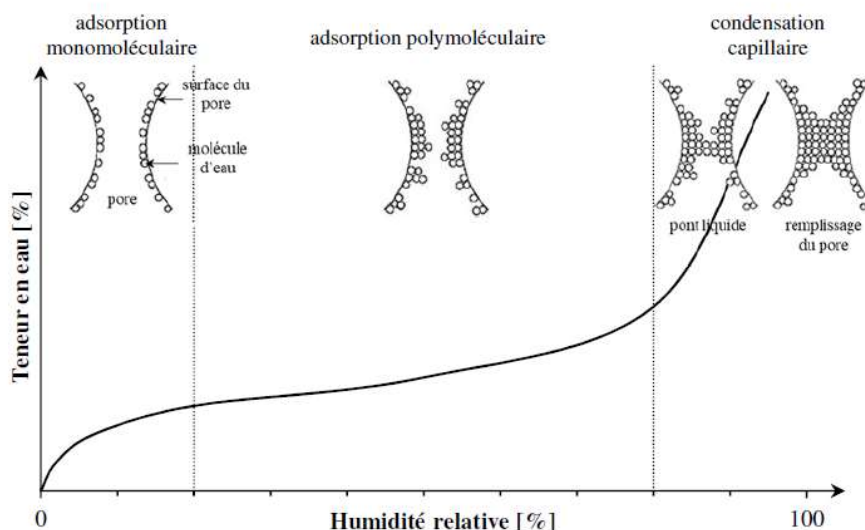


Figure 17 - Isotherme d'adsorption et modes de fixation de l'humidité dans un pore (Collet, 2004 ; Magniont, 2010).

Cette courbe de sorption décrit de manière macroscopique plusieurs phénomènes microscopiques. Dans l'ordre d'humidité relative croissante, elle illustre l'adsorption d'une couche de molécules d'eau à la surface des pores du matériau par les forces de Van der Waals, puis la fixation de plusieurs couches de molécules d'eau sur cette couche initiale. A ces deux stades du processus de sorption, les transferts vapeur et liquide cohabitent. Enfin la jonction des couches en un pont liquide pour des humidités relatives élevées entraîne le remplissage des pores les plus fins vers les plus larges (Claude, 2018).

La Figure 18 montre ces différents types de transferts au niveau des pores.

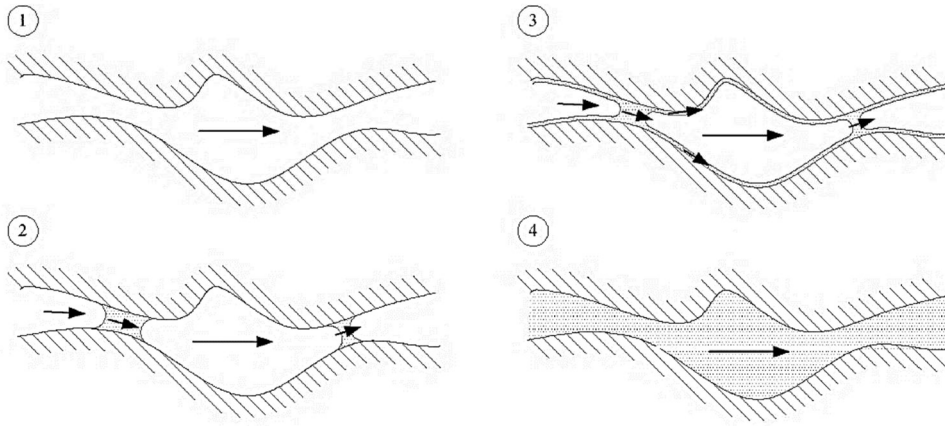


Figure 18 - Modes de transfert d'humidité selon la teneur en eau dans les pores (Peuhkuri, 2003).

Aux plus basses humidités relatives (1), le transport d'eau est réalisé en phase vapeur sous l'effet d'un gradient de pression. Avec l'augmentation de l'hygrométrie, la couche d'eau à la surface des pores s'épaissit et forme des ponts liquides. Le transport est régi par condensation-évaporation (2) et peut être accompagné par une diffusion de surface (3) : il s'agit alors d'un transport vapeur-liquide. Enfin, lorsque le milieu est saturé (4), le transport est liquide sous l'effet d'un gradient de pression capillaire. Ces phénomènes peuvent être décrits par les lois physiques, comme discuté ci-après.

La loi de Fick donne la densité du flux de vapeur en fonction du gradient de concentration de vapeur. Elle peut être écrite avec la loi des gaz parfaits afin d'exprimer la densité de flux sous le gradient de pression partielle de vapeur selon l'équation (3).

$$g_v = - \frac{D_a}{\mu R_v T} \nabla \rho_v = - \delta_p \nabla p_v \quad (3)$$

avec  $g_v$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) la densité du flux de vapeur,  $\mu$  (-) la résistance à la vapeur d'eau,  $\delta_p$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) la perméabilité à la vapeur d'eau sous gradient de pression partielle de vapeur  $\left[ \delta_p = \frac{\delta_v}{R_v T} \right]$ ,  $\delta_v$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) la perméabilité à la vapeur d'eau sous gradient de concentration de vapeur,  $D_a$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) le coefficient de diffusion,  $\rho_v$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) la concentration de vapeur d'eau et  $p_v$  (Pa) la pression de vapeur.

Le transport de vapeur d'eau diminue progressivement lorsque la teneur en eau liquide du milieu augmente jusqu'à devenir négligeable quand la saturation est atteinte. Dans ce cas, les transferts liquides sont dominants, comme montré sur la Figure 19.

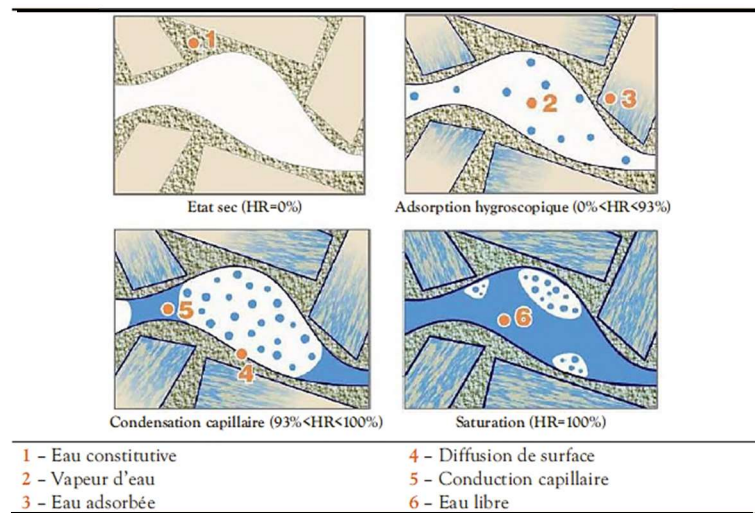


Figure 19 - Étapes de transfert d'humidité dans un milieu poreux en fonction de l'hygrométrie (Evrard, 2008 ; Nozahic, 2012).

La loi de Darcy quantifie ces transferts liquides en donnant la densité de flux d'eau liquide en fonction du gradient de pression capillaire comme décrit sur l'équation (4).

$$g_l = -K \frac{\partial p_c}{\partial x} \quad (4)$$

Avec  $g_l$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) la densité de flux liquide,  $p_c$  (Pa) la pression capillaire,  $K$  ( $\text{kg} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) la conductivité hydraulique, elle-même fonction de la pression capillaire  $p_c$  et  $x$  (m) la dimension de la région analysée.

Le gradient de pression capillaire n'étant pas possible à mesurer, les transferts liquides sont écrits en fonction de la teneur en eau du matériau. D'après la loi de Kelvin, la pression capillaire est une fonction de l'humidité relative, elle-même fonction de la teneur en eau (la relation est illustrée par l'isotherme de sorption). Le transfert liquide peut donc être écrit en fonction du gradient de teneur en eau selon l'équation (5).

$$g_l = -D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (5)$$

Avec  $g_l$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) la densité de flux liquide,  $D_w$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) le coefficient de diffusivité hydrique,  $w$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) la teneur en eau, et  $x$  (m) la dimension de la région analysée.

Le flux total d'humidité peut donc être écrit selon l'équation (6).

$$g_{\text{tot}} = g_{p_v} + g_w = -\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} - D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (6)$$

avec  $g_{\text{tot}}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) le flux total d'humidité,  $g_{p_v}$  le flux de vapeur dû à un gradient de pression de vapeur ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ),  $g_w$  le flux d'eau liquide dû à un gradient de teneur en eau ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ), tous les deux exprimés par les équations (3) et (5),  $p_v$  (Pa) la pression de vapeur,  $w$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) la teneur en eau et  $x$  (m) la dimension de la région analysée.

Le terme  $g_w$  prend en compte les phénomènes de succion capillaire et de diffusion de surface. Cette expression est une expression isotherme du flux, c'est-à-dire qu'elle ne prend pas en compte l'influence des variations de température sur les transferts d'humidité.

### 1.3.2 Effets de la température sur les transferts d'humidité

Les transferts d'humidité sont impactés par les changements de température au sein du matériau. Pour les transferts de vapeur, des transferts par effusion dits transferts de Knüdsen peuvent survenir. De plus, des transferts par thermodiffusion liés à une différence de densité dans la phase gazeuse causée par le gradient de température entraînent une migration des molécules des zones froides vers les zones chaudes (Seng, 2018). Toutefois, ces transferts restent très limités dans le domaine d'application du Génie Civil.

Pour les transferts liquides, la viscosité de l'eau peut être modifiée et un effet Soret semblable au phénomène de thermodiffusion peut survenir.

Un terme prenant en compte ces transferts sous un gradient de température est donc ajouté aux équations (3) et (5). Ce terme s'exprime comme montré sur l'équation (7).

$$g_{T,a} = -D_{T,a} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

avec  $g_{T,a}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) la densité de flux de vapeur ou d'eau liquide due à un gradient de température,  $D_{T,a}$  ( $\text{kg.K}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) le coefficient de diffusivité de vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de température,  $T$  (K) la température et  $x$  (m) la dimension de la région analysée.

### 1.3.3 Effets de l'humidité sur les transferts de chaleur

Si les transferts de chaleur peuvent influencer les transferts d'humidité, la réciproque est également vraie. En effet, le remplissage des pores du matériau par de l'eau liquide ou à l'état de vapeur fait augmenter la conductivité thermique du matériau à l'échelle macroscopique (Nicolai, 2007). Ainsi, la conductivité thermique du béton de chanvre varie presque linéairement avec sa teneur en eau (Gourlay *et al.*, 2017). (Shea *et al.*, 2012) concluent d'une analyse de la performance hygrothermique d'un bâtiment expérimental en chaux-chanvre que la résistance thermique seule des parois n'est pas un paramètre suffisant pour évaluer les performances de murs en chaux-chanvre soumis à des conditions météorologiques réelles. La prise en compte des transferts d'humidité dans les matériaux poreux entraîne également la nécessité de la prise en compte des phénomènes de chaleur latente dus aux changements de phase de l'eau, par exemple lors de sa sorption.

En négligeant les effets dus à la présence d'humidité, la diffusion de chaleur dans un matériau peut s'exprimer par la loi de Fourier selon l'équation (8).

$$q_{\text{diff}} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8)$$

avec  $q_{\text{diff}}$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) la densité de flux de chaleur,  $\lambda$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) la conductivité thermique du matériau,  $T$  (K) la température et  $x$  (m) la dimension de la région analysée.

Pour les matériaux poreux traversés par de l'humidité, cette expression est complétée par un terme prenant en compte la chaleur latente de changement de phase de l'eau (cf. équation (9)), ainsi que par un terme prenant en compte la chaleur sensible véhiculée par l'eau liquide ou sous forme de vapeur, noté  $q_{\text{sens}}$  (cf. équation (10)).

$$q_{\text{lat}} = L_v \nabla g_v \quad (9)$$

avec  $q_{\text{lat}}$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) quantité de chaleur due aux effets latents,  $L_v$  ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ ) la chaleur latente de vaporisation,  $g_v$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) la densité du flux de vapeur subissant le changement de phase.

$$q_{\text{sens}} = g_l C_{p,l} \nabla T + g_v C_{p,v} \nabla T \quad (10)$$

avec  $q_{\text{sens}}$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) la quantité de chaleur sensible véhiculée par la vapeur et l'eau liquide,  $g_l$  et  $g_v$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) la densité des flux respectivement d'eau liquide et de vapeur,  $C_{p,l}$  et  $C_{p,v}$  ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) la capacité thermique massique respectivement de l'eau liquide et de la vapeur,  $T$  (K) la température.

Afin de caractériser les transferts de masse et de chaleur dans le temps et dans l'espace, ces relations sont introduites dans des équations d'équilibres qui se présentent sous la forme d'équations aux dérivées partielles (EDP). La résolution de ces équations est faite par différents logiciels avec une approche numérique basée sur les volumes de contrôle ou les éléments finis. Selon (Claude, 2018), il n'existe pas une façon unique de décrire les transferts de chaleur et de masse au sein d'un matériau poreux. L'équation mathématique de conservation va dépendre des potentiels moteurs choisis et des hypothèses de simplification.

Dans le cadre de cette thèse, le passage entre les phénomènes de transferts à l'échelle microscopique vers l'échelle macroscopique se réalise grâce au volume élémentaire représentatif (VER), qui correspond au volume minimal à prendre en compte pour que les résultats obtenus soient représentatifs du comportement macroscopique du matériau (Claude, 2018). Le logiciel choisi est Delphin 6.1 qui sera présenté et détaillé au Chapitre 4.

Dans ce formalisme, on utilise l'approximation des milieux continus : les propriétés sont moyennées sur des VER représentant le milieu poreux à l'échelle macroscopique. Cette approche présente donc l'avantage de ne pas nécessiter une description exacte de la configuration des pores (distribution de tailles de pores, tortuosité, *etc.*), difficile à obtenir de façon précise pour les matériaux biosourcés.

La forme générale d'une équation de conservation s'écrit selon l'équation (11).

$$\frac{\partial \text{stockage}}{\partial t} = \nabla \cdot qA + s \quad (11)$$

avec  $qA$  la densité de flux relative à la quantité  $A$ ,  $t$  le temps et  $s$  un terme source.

En se plaçant à l'échelle du VER, l'équation traduit la variation temporelle d'une quantité  $A$ , lorsqu'un flux  $qA$  entre dans le volume, plus un terme source  $s$ , le flux étant généré par une différence de densité entre deux VER.

Les principaux transports de masse dans les matériaux de construction ainsi que leur potentiel moteur sont rassemblés dans le Tableau 4.

Tableau 4 - Principaux modes de transport d'humidité dans les matériaux de construction (Seng, 2018).

| <b>Mécanisme de transport</b> |                                 | <b>Potentiel moteur</b>           |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Transport vapeur              | Diffusion moléculaire           | Pression de vapeur                |
|                               | Effusion (diffusion de Knudsen) | Pression de vapeur                |
|                               | Advection                       | Pression totale                   |
|                               | Thermodiffusion (effet Soret)   | Température                       |
| Transport liquide             | Capillarité                     | Pression capillaire               |
|                               | Diffusion de surface            | Humidité relative (teneur en eau) |

Comme on peut le voir, l'étude du comportement du béton de chanvre est complexe. Cela se traduit pour une complexité des phénomènes au niveau des ambiances où on l'applique. Les différents transferts à l'intérieur du matériau et entre le matériau et l'air environnant sont responsables pour son intérêt en rénovation des bâtiments. Dans la partie suivante nous faisons donc une brève présentation des paramètres étudiés au niveau de l'ambiance intérieure lors de la mise en place d'un tel revêtement.

## 1.4 Modification de l'environnement intérieur

La pose d'un isolant biosourcé hygroscopique impacte la consommation énergétique, le confort et la qualité de l'air intérieure ainsi que la durabilité des parois concernés. Sa capacité de tampon hydrique, en adsorbant et désorbant la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant, doit réguler l'humidité intérieure et améliorer la sensation de confort ainsi que la qualité de l'air (Claude, 2018).

La notion de confort ressenti est difficile à paramétrer, mais des travaux récents ont montré l'influence de l'humidité relative sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur (Seng, 2018).

La qualité de l'air intérieur aborde les aspects sanitaires dans l'environnement intérieur et se trouve être un enjeu majeur aujourd'hui dans des bâtiments de plus en plus étanches. Les

pollutions rencontrées sont de trois origines : chimique (composés organiques volatils - COV), physique (particules en suspension) et biologique (bactéries, champignons). Les conditions hygrothermiques influencent le développement de ces pollutions : une forte humidité, typiquement au-dessus de 70% HR, favoriserait par exemple le développement de bactéries, champignons et acariens ou, au contraire, des humidités relatives trop basses provoqueraient un assèchement de la peau et des mucus (Seng, 2018).

Le graphique proposé par (Fauconnier, 1992) et présenté en Figure 20 résume les différentes zones d'air humide sur un diagramme psychrométrique. Un matériau hygroscopique permettrait d'amortir les conditions d'humidité extrême, assurant des conditions de confort appropriées tout en limitant le développement de micro-organismes.

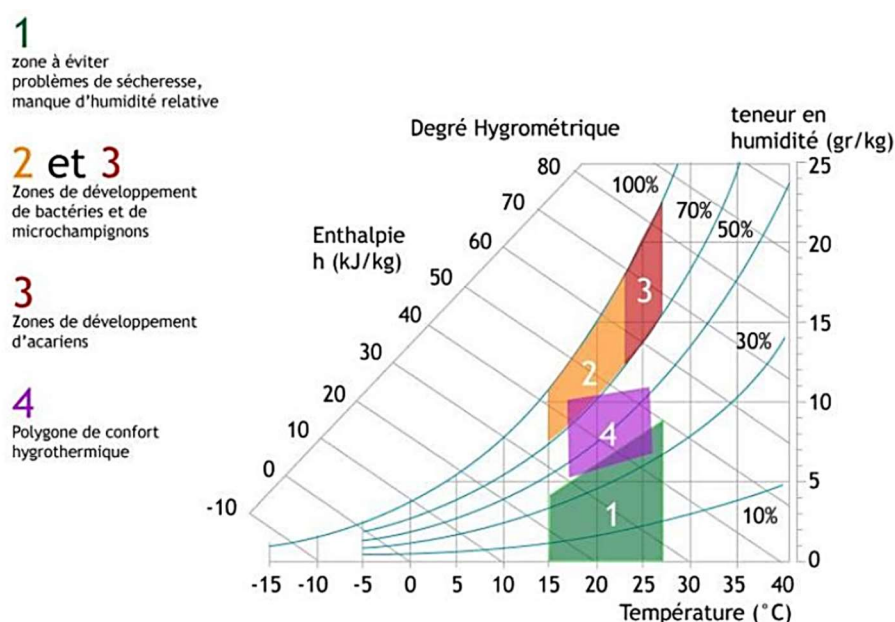


Figure 20 - Plage de confort hygrothermique (Fauconnier, 1992).

Il est important de souligner que dans le cadre de cette thèse nous n'avons pas mené d'analyse au niveau du confort car les bâtiments étudiés ne sont pas occupés. Des conditions qui simulent une occupation ont été mises en place (consigne de chauffage et humidificateurs) mais les études sont menées uniquement au niveau du comportement hygrothermique de la paroi. Les zones de confort sont présentées pour donner un ordre de grandeur et permettre au lecteur de se situer quand nous parlons des différents niveaux d'humidité ambiante pour les configurations de simulation d'occupation du bâtiment. Cette discussion est présentée aux Chapitres 3 et 4.

En vue de sa capacité à réduire l'impact carbone du secteur de la construction et plus spécifiquement de la rénovation des bâtiments anciens, le béton de chanvre se montre une solution intéressante à être mise en place. Ses propriétés thermohydrauliques et mécaniques sont le résultat d'un choix entre les caractéristiques des constituants (liants, adjuvants, chènevotte, *etc.*), leur proportion (formulation) et la mise en œuvre (banchage, compactage ou projection).

Les avantages hydriques liés à sa capacité de stocker de l'humidité en son sein et sa haute perméabilité permettent son usage en rénovation du bâti ancien tout en évitant les problèmes liés à la condensation interstitielle. Cependant, les résistances mécaniques recensées dans la littérature sont faibles et correspondent au facteur le plus contraignant limitant son utilisation.

L'optimisation des liants est une possibilité d'amélioration des résistances mécaniques en vue d'augmenter les possibilités d'usage de ce matériau. Dans ce sens, la chaux hydraulique et ses combinaisons apparaissent comme une solution pertinente grâce à sa compatibilité avec les granulats végétaux et à sa durabilité.

Dans ce chapitre nous avons listé les différents facteurs affectant les performances mécaniques, thermiques et hydriques des bétons de chanvre. Dans le chapitre suivant nous présentons l'étude menée par rapport à la formulation d'un béton de chanvre en vue de la rénovation de bâtiments anciens. Dans un premier temps, le choix des constituants est explicité et les propriétés mécaniques et thermiques sont évaluées. Dans un deuxième temps, la caractérisation des phénomènes de transport de fluides au niveau macroscopique liées à sa capacité à réguler passivement l'ambiance seront étudiés.



## **CHAPITRE 2 OPTIMISATION DE LIANTS BAS CARBONE POUR BLOC PREFABRIQUE EN BETON DE CHANVRE**

L'étude bibliographique menée précédemment montre que les bétons de chanvre sont reconnus pour l'intérêt de leurs propriétés hygrothermiques, notamment si l'on pense à la rénovation de parois intérieures de bâtiments. Cependant leur utilisation reste limitée, notamment du fait de leur faible résistance mécanique et de leur long temps de séchage, en particulier s'ils sont mis en œuvre par la technique du béton banché (Claude, 2018). Dans ce contexte, une solution de préfabrication semble être une perspective intéressante.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude d'optimisation de la phase liante utilisée pour la confection de plaques préfabriquées de béton de chanvre, avec pour objectif la rénovation hygrothermique de parois anciennes. La première partie du chapitre est consacrée au choix des constituants et aux stratégies utilisées pour obtenir un matériau ayant une résistance mécanique et des propriétés hygrothermiques visées. La deuxième partie du chapitre porte sur la détermination des propriétés mécaniques et hygrothermiques des matériaux retenus. La dernière partie du chapitre présente une analyse microstructurale visant à la compréhension des interactions entre les différents constituants.

Les plaques préfabriquées ont ensuite été utilisées en rénovation localisée d'un bâtiment ancien de la ville de Cahors et leurs propriétés hygrothermiques ont été évaluées *in-situ*. Cette analyse sera présentée au chapitre 3. Les propriétés mesurées dans la deuxième partie de ce chapitre seront utilisées pour alimenter un modèle numérique de transferts hygrothermiques au sein de la paroi afin de valider les plaques de chanvre préfabriquées comme solution de rénovation. Les résultats des simulations seront présentés dans le chapitre 4.

### **2.1 Optimisation de la phase liante**

Le réchauffement climatique, les économies d'énergie et les problématiques de cycle de vie sont autant de facteurs qui ont contribué à l'essor rapide des matériaux biosourcés pour le bâtiment, que l'on peut qualifier de matériaux multifonctionnels, respectueux de l'environnement et performants (Amziane et Sonebi, 2016).

Afin de limiter les impacts environnementaux de notre matrice cimentaire, nous nous sommes orientés dans nos travaux vers un liant sans ciment Portland.

L'objectif des recherches est ici de travailler sur la formulation d'un bloc de béton de chanvre qui puisse être préfabriqué, autoporteur, permettant d'assurer une isolation thermique répartie tout en possédant un bon comportement hygroscopique et ayant des impacts limités sur l'environnement. Comme dit précédemment, ces blocs préfabriqués en laboratoire ont vocation à être utilisés en rénovation d'un bâtiment dans le cadre de cette thèse. La préfabrication a été choisie pour permettre le séchage des blocs avant mise en place et ainsi éviter l'inconvénient d'un séchage long *in-situ*.

Une mise en place par projection aurait aussi pu être envisagée pour résoudre cette problématique. Cependant, la disposition spatiale des pièces dans les bâtiments anciens s'avère peu adaptée à cette solution en raison des surfaces trop petites et de la difficulté de garder la distance souhaitable pour le bon fonctionnement de l'équipement de projection. De plus, une mise en œuvre par plaques préfabriquées est beaucoup plus rapide et pratique dans le cadre d'une thèse qu'une mise en œuvre par projection.

## 2.1.1 Choix des constituants

### 2.1.1.1 Impact environnemental

Pour faire face aux préoccupations environnementales, le choix des matériaux peut apporter de nombreuses réponses (Collet, 2004). Parfois, ce choix est complexe car les qualités environnementales (ou défauts) des matériaux peuvent être contradictoires. Il faut alors définir une stratégie et des priorités pour orienter ce choix.

L'une des approches les plus retenues dans la littérature pour évaluer l'impact environnemental des matériaux est l'analyse de cycle de vie (AFNOR, 2006). Le cycle de vie est l'ensemble des états par lesquels passe un produit de la phase d'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication du produit à la phase d'élimination de celui-ci en fin de vie (ou fin d'usage).

Une analyse du cycle de vie de blocs de béton de chanvre a été effectuée par (Arrigoni *et al.*, 2017). L'unité fonctionnelle (UF) considérée était un mètre carré de mur non porteur en blocs de chanvre avec épaisseur de 0,25 m et valeur U de 0,27 W/(m<sup>2</sup>·K). Une seule face était en contact avec l'air. Les auteurs ont identifié la phase de production des matières premières

comme la principale source d'impacts environnementaux, mais la distance de transport des matières premières, ainsi que la quantité et la composition du mélange de liants, peuvent considérablement affecter les résultats. A titre d'exemple, l'empreinte carbone calculée pour leur bloc de béton de chanvre est de -12,09 kg CO<sub>2</sub> eq/UF.

On constate aussi un manque de données fiables concernant l'étape de fin de vie des bétons de chanvre. Néanmoins, le bilan global des émissions pour différentes formulations est très favorable : grâce à l'absorption de CO<sub>2</sub> biogénique lors de la croissance du chanvre et à l'absorption de CO<sub>2</sub> par la carbonatation des liants, les blocs de béton de chanvre ont une empreinte carbone négative et agissent donc comme des puits de carbone efficaces (Amziane et Sonebi, 2016 ; Arrigoni *et al.*, 2017 ; Bumanis *et al.*, 2020). Les valeurs d'empreinte carbone trouvées dans la littérature, en fonction des UFs choisies, varient entre -1,6 kg CO<sub>2</sub> eq/UF (Pretot *et al.*, 2014) et -36,08 kg CO<sub>2</sub> eq/UF (Ip et Miller, 2012) selon les différentes études.

(Arehart *et al.*, 2020) ont analysé le potentiel théorique de stockage et de séquestration de carbone du béton de chanvre. Les auteurs ont estimé le pourcentage des émissions de CO<sub>2</sub> de fabrication qui peut être récupéré grâce à la carbonatation *in-situ* du liant. Ils ont mis en œuvre un modèle d'analyse du cycle de vie de 36 formulations de béton de chanvre de différentes teneurs et densités de liant en utilisant une UF équivalente de 1 m<sup>2</sup> d'assemblage mural avec une valeur U de 0,27 W/(m<sup>2</sup>.K). Les auteurs estiment qu'entre 18,5% et 38,4% des émissions initiales de carbone associées à la production de liant peuvent être séquestrées par carbonatation *in-situ*.

En ce qui concerne le choix des liants, la carbonatation est donc mise en avant non seulement pour son pouvoir de puits de carbone, mais aussi pour sa capacité à améliorer la résistance mécanique des mélanges au cours du temps.

### 2.1.1.2 Liants

Au-delà de l'impact environnemental et de la résistance mécanique, la résistance à la prolifération de moisissures est aussi un paramètre à prendre en compte quand un matériau biosourcé est ajouté à la matrice liante, d'autant plus si ce matériau a vocation à servir de régulateur hydrique dans une ambiance intérieure. Dans ce contexte de durabilité du béton de chanvre, il est possible de considérer que les ajouts de chaux sont efficaces contre les moisissures comme cela a été démontré par (Krejsová et Doleželová, 2019).

Nous avons donc choisi de travailler avec deux familles de liants : un liant pouzzolanique alternatif à base de chaux hydraulique naturelle (NHL) et de métakaolin flash (MK), régulièrement utilisé avec les agro-ressources, et un liant alcali-activé de laitier de haut fourneau (GGBFS) et de la même chaux hydraulique naturelle, plus original pour ce type d'application. Le Tableau 5 présente la composition chimique des matériaux utilisés dans les liants.

Tableau 5 - Composition chimique des matériaux utilisés dans les liants (données fabricant).

|       | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | MgO  | CaO   | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | Perte au feu (%) |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|-------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| MK    | 70,00            | 24,00                          | 3,70                           | 1,23             | 1,28 | 0,75  | 0,25             | 0,19              | -               | 0,84             |
| GGBFS | 37,70            | 10,20                          | 0,60                           | 0,70             | 6,40 | 43,8  | 0,28             | 0,21              | 0,10            | 0,96             |
| NHL   | 15,00            | 1,92                           | 0,57                           | -                | 1,01 | 59,00 | 0,21             | 0,07              | 0,41            | 40,00            |

#### a Chaux hydraulique naturelle

La chaux est un produit naturel recyclable obtenu par calcination et décarbonatation d'une roche calcaire. Selon la nature du calcaire utilisé la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux, dont la chaux hydraulique naturelle qui provient d'un calcaire argileux et qui sera utilisée dans cette étude.

La chaux peut se présenter sous différentes formes, il peut s'agir de chaux vive ou de chaux éteinte. La chaux vive correspond au matériau après calcination et contient essentiellement du CaO. La chaux éteinte est obtenue par réaction de la chaux vive avec l'eau et contient donc essentiellement du Ca(OH)<sub>2</sub>. En fonction de la quantité d'eau, la chaux éteinte sera sous forme de poudre, de lait de chaux ou de pâte de chaux. La Figure 21 présente les différentes phases du cycle de la chaux.

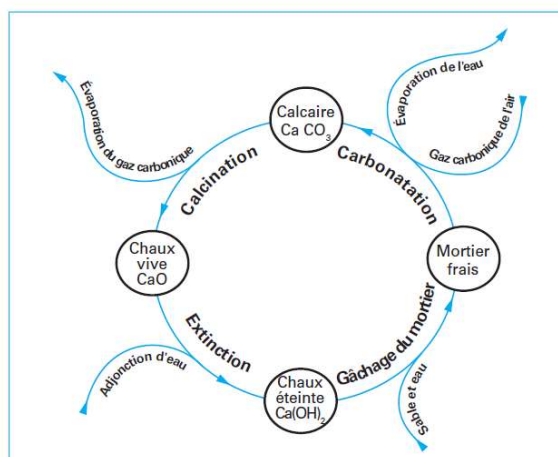


Figure 21 - Cycle de la chaux (Collet, 2004).

Comme indiqué sur cette figure, les étapes de formation de la chaux hydraulique naturelle sont donc la calcination, l'extinction et éventuellement le broyage. En plus de la minéralogie du gisement (calcaire plus ou moins argileux), la méthode et la température de cuisson de la roche calcaire sont les facteurs qui vont influencer la quantité de silice qui se combinera lors du processus avec de l'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) pour former des silicates de calcium ( $\text{C}_2\text{S}$  ou  $\text{C}_3\text{S}$  selon la température du four), responsables de l'hydraulicité du matériau. La cuisson a généralement lieu dans un four vertical à une température maximale de  $1000^\circ\text{C}$  (pour mémoire la production du ciment Portland nécessite de monter à  $1450^\circ\text{C}$ ), le combustible utilisé étant du charbon anthracite utilisé en raison de sa pureté (entre 92 et 95% de carbone) (Magniont, 2010).

L'étape suivante est l'extinction, procédé contrôlé très précisément qui permet d'obtenir un produit fini quasiment sans chaux vive (teneur en  $\text{CaO} < 1\%$ ) de manière à éviter toute réaction ultérieure (forte exothermie et gonflements).

La production de chaux hydraulique naturelle induit, tout comme celle du ciment, une émission de  $\text{CO}_2$  importante liée d'une part à la consommation de combustibles fossiles pour la calcination du cru et, d'autre part, à la décarbonatation des matières premières. Selon (Magniont, 2010), en ce qui concerne l'émission de  $\text{CO}_2$ , la production de NHL 5 génère  $275 \text{ kg CO}_2/\text{t}$  liés à la combustion du charbon et  $360 \text{ kg CO}_2/\text{t}$  liés à la décarbonatation des matières premières, soit un total de  $635 \text{ kg CO}_2/\text{t NHL 5}$  et une consommation de combustible de  $75 \text{ kg}$  de charbon par tonne de NHL 5. A noter toutefois qu'une grande partie des émissions de  $\text{CO}_2$  liées à la décarbonatation sera ensuite refixée chimiquement lors de la carbonatation

naturelle de la chaux pour former de la calcite, ce qui conduit à abaisser l'impact environnemental de ce liant.

La chaux hydraulique utilisée est une NHL 5 de marque Saint Astier, et provient de la ville du même nom. Le choix d'une NHL 5 (chaux naturelle de résistance mécanique normalisée mesurée sur mortier suivant la norme EN 196-1 supérieure ou égale à 5 MPa à 28 jours) se justifie par les objectifs performanciers souhaités pour un bloc préfabriqué en béton de chanvre mais aussi car la NHL 5 de Saint Astier contient une part non négligeable de constituants carbonatés (23% de  $\text{CaCO}_3$ ) ce qui en diminue son impact environnemental (qui serait inférieur à 500 kg  $\text{CO}_2$ /t NHL 5 d'après le fabricant). Sa surface spécifique Blaine est de 8500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Le Tableau 6 présente la composition minéralogique de la NHL 5 utilisée. On peut vérifier la présence de composés hydrauliques de type  $\text{C}_2\text{S}$  (43%) et minoritairement de  $\text{C}_2\text{AS}$  (1,3%) et  $\text{C}_4\text{AF}$  (0,7%).

Tableau 6 - Composition minéralogique de la NHL5 de Saint Astier (données fabricant).

| Composant                | Composition (%) |
|--------------------------|-----------------|
| Insolubles               | 5,6             |
| $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 22,0            |
| $\text{CaCO}_3$          | 23,0            |
| $\text{C}_2\text{S}$     | 43,0            |
| $\text{C}_3\text{A}$     | 0,7             |
| $\text{C}_2\text{AS}$    | 1,3             |
| $\text{C}_4\text{AF}$    | 0,7             |
| $\text{CaSO}_4$          | 0,7             |

## **b** Métakaolin

Pour obtenir des résistances mécaniques plus importantes, nous avons choisi de mélanger un matériau pouzzolanique à la chaux pour que celui-ci réagisse avec l'hydroxyde de calcium pour former des silicates de calcium hydratés et des silico-aluminates de calcium hydratés qui sont des hydrates résistants mécaniquement et stables d'un point de vue thermodynamique. Le métakaolin a été retenu car c'est un matériau issu de la cuisson entre 650 et 800°C de kaolin broyé ce qui limite encore les émissions de  $\text{CO}_2$  liées à la production à moins de 250 kg  $\text{CO}_2$ /t MK selon le fabricant.

Le métakaolin utilisé est de type « Argicem® », commercialisé par la société Argeco, située à Fumel dans le Lot et Garonne. Il est produit par la méthode de calcination appelée « flash ». Ce

procédé consiste en une calcination ultra-rapide des particules de kaolinite injectées dans un flux de gaz, la durée d'exposition n'étant que de quelques dixièmes de secondes. Le broyage se fait avant la calcination, au niveau du cru, ce qui demande beaucoup moins d'énergie. De plus, cette technique permet la calcination d'un produit moins « noble » renfermant en particulier d'importantes quantités de quartz et limite les problèmes de surcuisson et la formation de mullite, non réactive.

Ce matériau est donc formé d'une partie amorphe et d'une autre partie cristalline constituée principalement par du quartz. Il présente différents types de particules : angulaires de petite taille ( $< 1 \mu\text{m}$ ), qui peuvent être agglomérées les unes sur les autres ou pas, et sphériques ( $< 10 \mu\text{m}$ ). La présence d'impuretés et le format arrondi des particules du métakaolin entraînent une chute de la surface spécifique de ce matériau et donc une diminution de la demande en eau par rapport à des métakaolins traditionnels plus purs et obtenus en calcination en lit fixe. Sa surface spécifique BET est de  $15,7 \text{ m}^2/\text{g}$  (Bucher, 2015) ce qui est une valeur assez élevée.

Le Tableau 7 présente la composition minéralogique du métakaolin utilisé. On peut souligner que seule une moitié du matériau peut être considérée comme active (métakaolinite).

Tableau 7 - Composition minéralogique du métakaolin (Pouhet, 2015).

| Composant     | Composition (%) |
|---------------|-----------------|
| Métakaolinite | 50              |
| Quartz        | 45              |
| Calcite       | 1               |
| Anatase       | 1               |
| Kaolinite     | 1               |
| Mullite       | 2               |

### c Laitier de haut fourneau

Le laitier d'haut fourneau est un sous-produit de la fabrication du fer. Les hauts fourneaux sont alimentés avec un mélange contrôlé de minerai de fer, de coke (charbon) et de calcaire à une température d'environ  $1500^\circ\text{C}$ . Les deux produits obtenus sont le fer fondu et le laitier fondu qui comprend principalement des silicates et de l'alumine du minerai de fer d'origine, combinés à certains oxydes de calcium.

Le processus de granulation du laitier implique le refroidissement du laitier fondu par des jets d'eau à haute pression. Ce refroidissement rapide empêche la formation de cristaux plus gros et

le matériau granulaire résultant comprend environ 95% d'aluminosilicates de calcium non cristallins. Le laitier granulé est ensuite séché et puis broyé dans un broyeur à billes rotatif se transformant en une poudre très fine, le GGBFS.

Nous avons utilisé le laitier commercialisé par la société Ecocem qui récupère le laitier granulé de haut-fourneau en tant que co-produit de la production de la fonte dans ses usines de Fos-sur-Mer. La production d'une tonne de laitier moulu Ecocem en France dégage en moyenne 16 kg de CO<sub>2</sub> soit en moyenne 45 fois moins qu'une tonne de ciment traditionnel. A noter toutefois que ce chiffre est controversé car il ne prend pas en compte une partie du CO<sub>2</sub> dégagée lors de la fabrication de l'acier qui devrait en toute logique lui être affectée (règle des allocations). Sa surface spécifique BET est de 0,45 m<sup>2</sup>/g (Ecocem, 2022).

Des similitudes existent entre les produits formés par l'hydratation du laitier et ceux formés à partir de l'hydratation du ciment Portland pur, mais il existe une différence majeure dans la minéralogie et dans le rapport Ca/Si des phases C-S-H.

#### 2.1.1.3 Sable

Pour la préparation des mortiers nous avons utilisé du sable de référence CEN, conforme à la norme française EN 196-1 (AFNOR, 2016b). C'est un sable naturel siliceux à grains arrondis, d'une teneur en silice au moins égale à 98%.

#### 2.1.1.4 Chènevotte

Nous avons utilisé la chènevotte calibrée et dépoussiérée Biofibat<sup>®</sup> issue du défibrage des pailles de chanvre cultivées dans la région Pays de la Loire. Le taux de fibres et poussières est inférieur à 2%, l'épaisseur des particules varie entre 1 et 3 mm, leur longueur entre 5 et 25 mm. Sa masse volumique sèche en vrac est de 110 kg/m<sup>3</sup> et le taux d'absorption d'eau (sur 24 heures) est de 400%.

La Figure 22 montre la chènevotte sèche et après l'essai d'absorption d'eau.



Figure 22 - Chênevotte Biofibat® (a) à l'état sec et (b) après essai d'absorption d'eau.

### 2.1.1.5 Adjuvants

L'adjuvantation des liants à base de chaux, et notamment celle destinée à diminuer leur demande en eau, n'est pas courante et il n'existe pas de produits commerciaux vendus spécifiquement pour ce type d'application. C'est la raison qui nous a amené à tester plusieurs superplastifiants de manière à en sélectionner un pour la suite de l'étude. Nous nous sommes orientés vers des adjuvants en poudre de manière à faciliter leur usage en préfabrication.

Nous avons testé quatorze adjuvants superplastifiants haut réducteurs d'eau en poudre différents comprenant des polymères synthétiques linéaires ou ramifiés (polynaphtalènes, polyacrylates, éthers polycarboxyliques, *etc.*).

Pour étudier l'efficacité des superplastifiants tout en limitant le nombre d'essais, nous avons dans un premier temps testé tous les superplastifiants avec les mortiers classiques de chaux et métakaolin (CHMK) et ensuite, dans un deuxième temps, testé seulement les adjuvants ayant donné les meilleurs résultats avec CHMK sur les mortiers de laitier de haut fourneau et chaux (LTCH). Globalement, quatre types d'échantillons ont été fabriqués, prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ), cubiques ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ), cylindriques ( $\Phi 10 \times h 5 \text{ cm}^3$ ) et en format de plaques ( $33 \times 33 \times 10 \text{ cm}^3$ ), selon deux méthodes de coulage différentes, banchage (cubes et prismes) ou vibrocompactage (cubes, cylindres et plaques).

Les sous-parties suivantes décrivent le type d'échantillon et les essais réalisés pour le choix de l'adjuvant et pour la validation des mélanges retenus selon la méthodologie présentée sur la Figure 23.

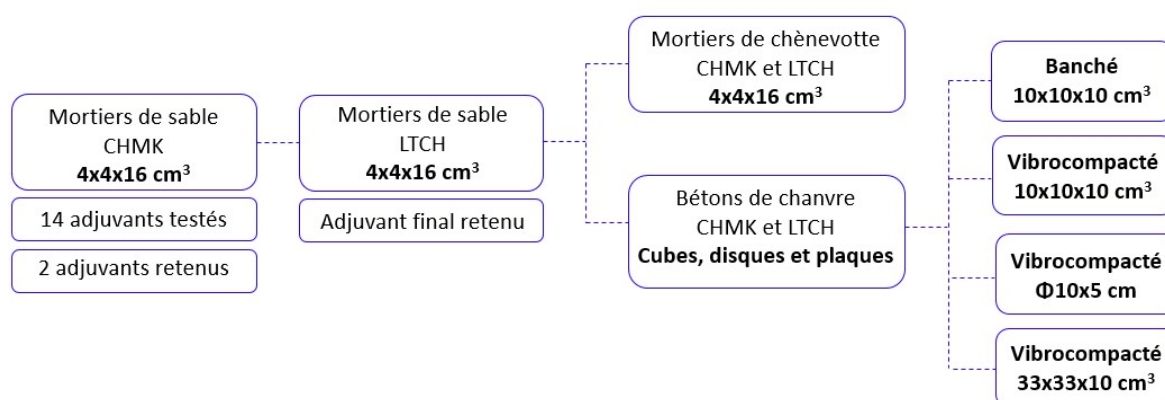


Figure 23 - Aperçu global de la méthodologie utilisée pour valider les mélanges étudiés.

Les paramètres analysés pour les mortiers de sable et de chènevotte dans les sous-parties suivantes sont résumés sur la Figure 24.

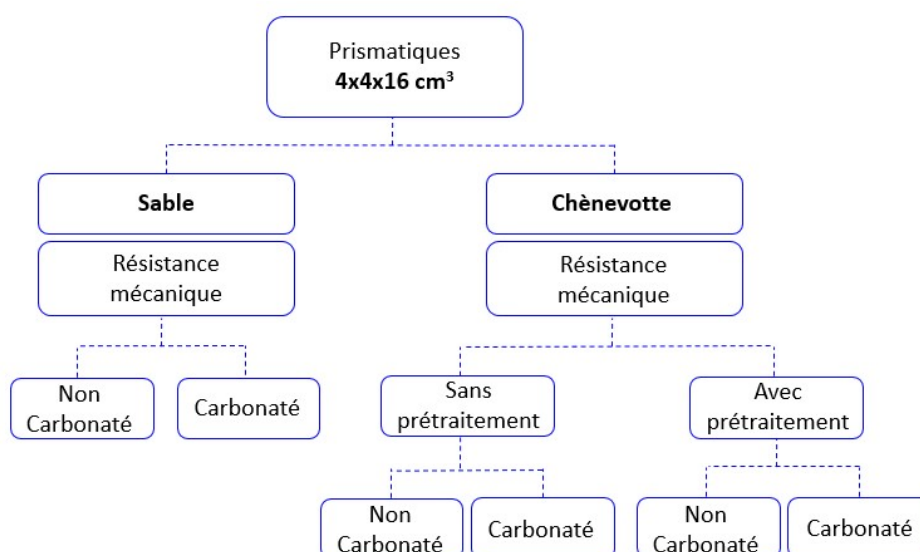


Figure 24 - Paramètres analysés.

### 2.1.2 Choix de l'adjuvant sur mortier de sable

Nous présentons à présent les essais réalisés sur mortiers de sable afin de déterminer l'adjuvant le plus performant en termes de réduction d'eau et de résistance mécanique avec nos deux liants.

### 2.1.2.1 Formulations

Le liant CHMK est composé en masse de 2/3 de chaux et 1/3 de métakaolin en se basant sur les études menées par (Magniont, 2010) et (The Manh, 2014) qui avaient déterminé ces proportions à partir de calculs stœchiométriques.

Le liant de LTCH est composé en masse de 2/3 de laitier et 1/3 de chaux. En effet, même si dans la littérature on retrouve des liants alcali-activés à base de laitier de haut fourneau (GGBFS) et de chaux vive (CaO) ou éteinte (Ca(OH)<sub>2</sub>) avec des teneurs en chaux qui varient entre 5 et 15% (Yang *et al.* 2012 ; Kim *et al.* 2013 ; Seo *et al.* 2021), nous avons préféré retenir une teneur en chaux hydraulique plus élevée (33,3%) afin d'améliorer les résistances initiales (Dai *et al.* 2021 ; Seo *et al.* 2021).

Les formulations testées et les masses volumiques après démoulage des mélanges CHMK et LTCH sont présentées Tableau 8 et Tableau 9, respectivement. Les codes utilisés correspondent aux adjuvants testés (confidentiel) sauf pour les témoins, représentés par la lettre « T ».

Le rendement volumique des formulations est de  $98 \% \pm 2$  pour les mélanges CHMK et de  $89 \% \pm 1$  pour les mélanges LTCH. Ce rendement un peu faible pour les mortiers LTCH est lié à une diminution importante de la quantité d'eau, non compensée, et à une surestimation de l'air entraîné (et donc une sous-estimation de la masse volumique théorique).

Tableau 8 - Formulations des mortiers de sable en CHMK.

| Formulation |           |                |           |              |                |      | Démoulage                            |
|-------------|-----------|----------------|-----------|--------------|----------------|------|--------------------------------------|
| CODE        | Chaux (g) | Métakaolin (g) | Sable (g) | Adjuvant (g) | Eau totale (g) | E/L  | Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) |
| T1          | 300       | 150            | 1350      | -            | 288,80         | 0,64 | 2,116                                |
| T2          | 300       | 150            | 1350      | -            | 315,31         | 0,70 | 2,132                                |
| DN          | 300       | 150            | 1350      | 2,25         | 288,20         | 0,64 | 2,095                                |
| AK          | 300       | 150            | 1350      | 2,25         | 302,54         | 0,67 | 2,038                                |
| UN          | 300       | 150            | 1350      | 2,25         | 288,00         | 0,64 | 2,165                                |
| C1          | 300       | 150            | 1350      | 0,90         | 288,00         | 0,64 | 2,117                                |
| C5          | 300       | 150            | 1350      | 0,90         | 280,00         | 0,62 | 2,126                                |
| C7          | 300       | 150            | 1350      | 0,90         | 280,00         | 0,62 | 2,123                                |
| R5          | 300       | 150            | 1350      | 22,50        | 280,00         | 0,62 | 2,153                                |
| R52         | 300       | 150            | 1350      | 22,50        | 260,00         | 0,58 | 2,153                                |
| M2          | 300       | 150            | 1350      | 0,90         | 280,00         | 0,62 | 2,130                                |
| M4          | 300       | 150            | 1350      | 0,90         | 280,00         | 0,62 | 2,179                                |
| M6          | 300       | 150            | 1350      | 0,90         | 280,00         | 0,62 | 2,173                                |
| ML          | 300       | 150            | 1350      | 0,90         | 288,00         | 0,64 | 2,181                                |
| FB          | 300       | 150            | 1350      | 0,90         | 288,00         | 0,64 | 2,163                                |
| DY1         | 300       | 150            | 1350      | 0,90         | 280,00         | 0,62 | 2,129                                |
| DY2         | 300       | 150            | 1350      | 4,50         | 241,40         | 0,54 | 2,212                                |

Tableau 9 - Formulations des mortiers de sable en LTCH.

| Formulation |           |             |           |              |                |      | Démoulage                            |
|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|----------------|------|--------------------------------------|
| CODE        | Chaux (g) | Laitier (g) | Sable (g) | Adjuvant (g) | Eau totale (g) | E/L  | Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) |
| T1          | 150       | 300         | 1350      | -            | 250,00         | 0,56 | 2,275                                |
| DY1         | 150       | 300         | 1350      | 4,50         | 200,00         | 0,44 | 2,245                                |
| DY2         | 150       | 300         | 1350      | 4,50         | 180,00         | 0,40 | 2,276                                |
| R5          | 150       | 300         | 1350      | 22,50        | 180,00         | 0,40 | 2,226                                |

### 2.1.2.2 Essais sur mortiers de sable

Dans la suite nous présentons les essais sur mortiers de sable effectués pour le choix de l'adjuvant.

### a Fabrication des mortiers

Le rapport E/L a, dans un premier temps, été ajusté lors du malaxage pour obtenir visuellement un mélange de maniabilité comparable, jusqu'à obtention d'une pâte onctueuse sans ségrégation.

La procédure de fabrication des mortiers, réalisée dans une salle à  $20^{\circ}\text{C} \pm 2$  est décrite ci-dessous :

- Pesée de l'ensemble des constituants ;
- Mélange des différents composants du liant et de l'adjuvant avec l'eau pendant environ 1 minute à vitesse lente et en mode manuel jusqu'à ce que le mélange soit homogène ;
- Arrêt du malaxeur et incorporation du sable ;
- Remise en fonctionnement du malaxeur en mode automatique (norme EN 196-1) en observant l'évolution de la consistance ;
- Ajout de l'eau supplémentaire, si nécessaire.

### b Essais à l'état frais

A l'état frais, soit dans les 15 minutes suivant la fin du malaxage, nous avons effectué les essais d'étalement au mini-cône et de temps d'écoulement au maniabilimètre à mortier.

La méthode du mini-cône est une manière simple, peu coûteuse et rapide pour étudier la rhéologie des pâtes. Il n'existe pas encore de protocole standard décrivant la procédure. Le mini-cône correspond à un moule tronconique de 15 cm de haut, de 10 cm de diamètre à sa base et de 5 cm à sa partie supérieure. Le mortier est mis en place en deux couches dans le moule, chaque couche étant compactée par 10 coups au moyen d'un pilon. Après avoir arasé le mortier avec une truelle, le moule est retiré verticalement et l'écart entre la hauteur du moule et le sommet du mortier étalé correspondant à l'affaissement est mesuré.

Le maniabilimètre utilisé est conforme à la norme NF P18-452 (AFNOR, 2017). Cet appareil est constitué d'un compartiment partagé en deux volumes inégaux par une paroi amovible. L'essai consiste à mesurer le temps mis par le mortier pour s'écouler du grand volume vers le petit volume sous l'action de la vibration.

### c Fabrication et conservation des éprouvettes

Pour chaque mélange coulé, nous avons fabriqué trois éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  avec une mise en place dans les moules avec une table à chocs dans des conditions normalisées (2 x 60 coups). Les moules ont été placés ensuite dans une pièce à  $20^\circ\text{C} \pm 1$  en protégeant les mortiers de la dessiccation.

Afin d'obtenir une résistance suffisante au démoulage, les éprouvettes ont été démoulées 3 à 5 jours après le coulage. Après démoulage, les éprouvettes ont été pesées et puis conservées dans une salle à  $20^\circ\text{C} \pm 1$  et  $65\% \pm 5 \text{ HR}$  jusqu'à l'échéance d'essai ( $28 \pm 1$  jours).

### d Essais mécaniques

A l'échéance d'essai, les éprouvettes ont été testées en flexion. Après la rupture en flexion chaque moitié des échantillons a été soumise durant 7 jours à un type de cure différent, soit en enceinte de carbonatation accélérée à  $20^\circ\text{C} \pm 1$ ,  $65\% \pm 5 \text{ HR}$  et  $50\% \pm 2$  de  $\text{CO}_2$ , soit en chambre climatique à  $20^\circ\text{C} \pm 1$  et  $65\% \pm 5 \text{ HR}$ .

Après cette période de cure, nous avons réalisé la rupture à la compression selon la norme française EN 196-1 (AFNOR, 2016b).

#### 2.1.2.3 Résultats des essais pour le choix de l'adjuvant

Dans cette partie nous présentons les résultats des essais sur mortiers, aux états frais et durci, qui ont conduit au choix de l'adjuvant.

##### a Résultats à l'état frais

L'objectif de ces essais réalisés sur mortier frais est de sélectionner les adjuvants qui permettent à la fois de diminuer le temps d'écoulement tout en augmentant l'affaissement au mini-cône et en réduisant l'eau.

La Figure 25 présente les résultats du temps d'écoulement au maniabilimètre en fonction de l'affaissement au mini-cône.

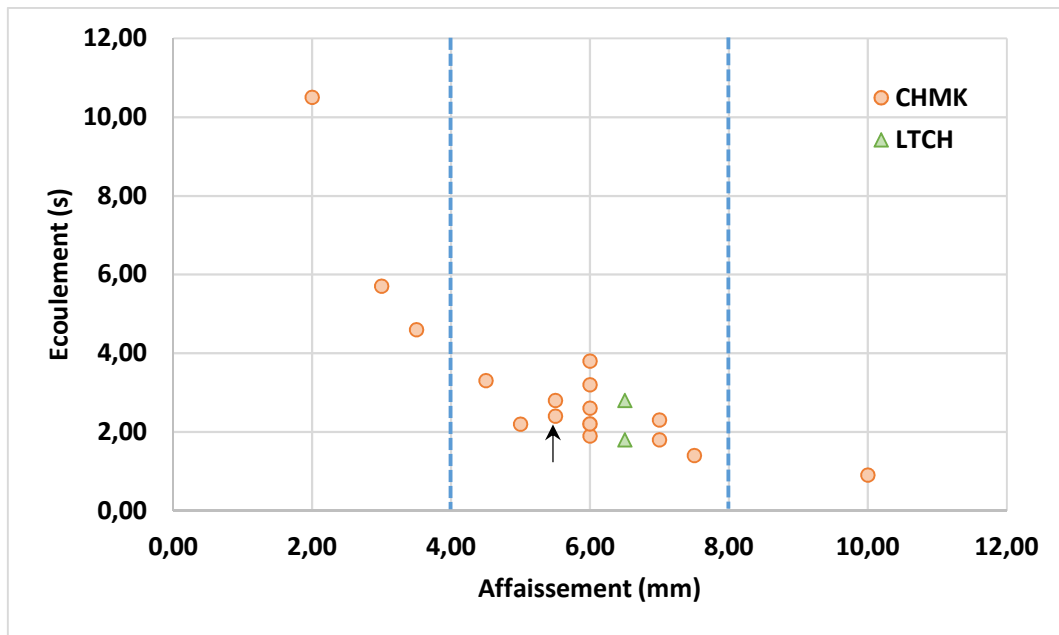


Figure 25 - Ecoulement et affaissement des mortiers de sable étudiés. La flèche indique l'adjuvant retenu et les lignes en pointillés la plage d'affaissement visée.

On retrouve sur ce diagramme la relation classique entre le temps d'écoulement et l'affaissement : le temps d'écoulement diminue lorsque l'affaissement augmente. Ensuite, à part quelques points qui s'éloignent de la zone de consistance visée (affaissement de  $6 \text{ mm} \pm 2$ ), on a peu de variation du temps d'écoulement qui peut s'expliquer par une cohésion équivalente donnée par les adjuvants.

A noter que la flèche indique l'adjuvant retenu pour le mélange CHMK.

Pour le mélange LTCH nous avons obtenu des mortiers autoplacants avec les adjuvants testés avec des affaissements supérieurs à 150 mm et des temps d'écoulement inférieurs à 2 s (ce que explique la faible quantité de points pour ce liant sur la Figure 25). Ce résultat peut être relié à la fois aux différences de formulation (moins de chaux NHL dans le mortier LTCH, addition utilisée différente avec le laitier qui présente une surface spécifique bien plus faible que celle du métakaolin). Il serait donc possible de diminuer encore la quantité d'eau pour ces mélanges afin d'obtenir le même niveau d'affaissement que celui des mortiers CHMK. Tel qu'énoncé par (Sitarz *et al.*, 2020), le sujet de la rhéologie des matériaux alcali-activés n'a pas encore été entièrement exploré et la littérature disponible est limitée à une gamme étroite de compositions de matériaux qui n'utilise généralement pas d'adjuvant.

## b Résultats à l'état durci

Des tests de résistance à la compression ont été menés sur les échantillons réalisés. Les résultats obtenus pour les deux types de liant et les deux types de cure selon le type d'adjuvant utilisé sont présentés Figure 26. Sur ce même graphique est indiqué aussi le rapport E/L de chacun des mélanges réalisés à maniabilité constante (aux dispersions près décrites dans le comportement à l'état frais).

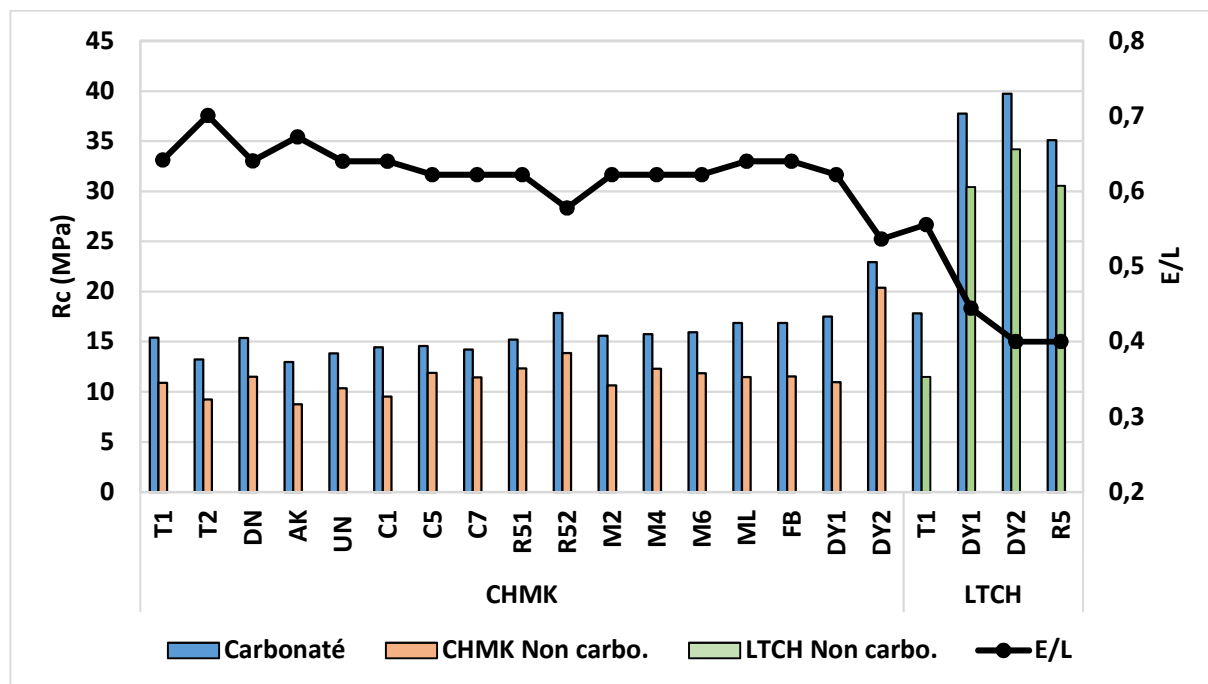


Figure 26 - Résistance en compression des mortiers de sable en fonctions des différents adjuvants testés, la nomenclature des codes en abscisse est donnée aux tableaux 8 et 9.

Si on regarde dans un premier temps les résultats obtenus sur mortiers CHMK, on peut voir que les résistances après carbonatation accélérée sont toujours supérieures à celles obtenues après conservation sans CO<sub>2</sub> supplémentaire. On a ainsi aux alentours de 15 MPa après carbonatation accélérée contre 11 MPa environ pour une carbonatation normale. Ceci montre bien le rôle important de la carbonatation dans le processus d'acquisition de résistance de mortiers à base de chaux. En ce qui concerne le rôle des adjuvants, on peut voir que deux adjuvants permettent d'avoir une réduction d'eau plus importante (R52 et DY2) et par conséquent des résistances plus élevées surtout dans le cas de DY2 (adjuvant DY avec un dosage plus élevé) comparativement aux témoins T1 et T2 sans adjuvant (plus de 20 MPa pour CHMK avec DY2 contre 11 à 15 MPa pour T1 selon le type de cure).

Les deux adjuvants conduisant aux meilleures performances avec CHMK ont été testés ensuite avec les mortiers LTCH. On peut voir que les deux adjuvants ont permis une forte réduction d'eau à maniabilité équivalente ce qui se traduit par une forte augmentation des résistances mécaniques (supérieures à 30 MPa). On peut noter aussi le rôle favorable de la carbonatation sur les résistances en compression pour ces mortiers alcalis-activés.

La Figure 27 présente la variation des résistances en compression des différents mortiers testés en fonction du rapport E/L.

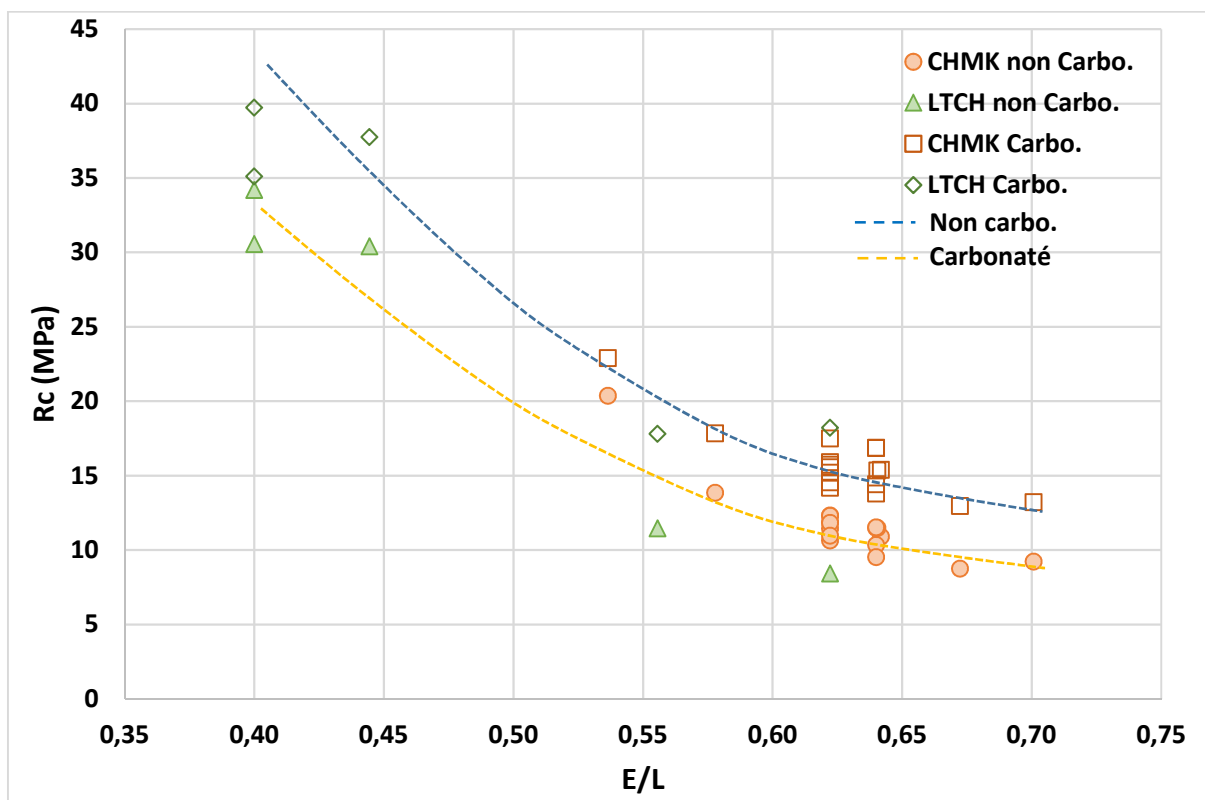


Figure 27 - Résistance mécanique en fonction du rapport E/L pour les différents adjuvants testés.

On retrouve tout d'abord sur ce diagramme la relation classique entre la résistance mécanique et le rapport E/L : la résistance diminue lorsque le rapport E/L augmente.

L'adjuvant le plus performant (résistance/dosage) pour les deux types de liants utilisés étant le DY (Dynamon SP3 de la société MAPEI, adjuvant à base d'acryliques modifiés), nous l'avons retenu pour la suite de l'étude pour le coulage des échantillons de béton de chanvre.

Nous présentons sur la Figure 28 la synthèse des résistances mécaniques avec carbonatation accélérée et sans carbonatation accélérée et les rapports E/L finaux pour les deux liants CHMK et LTCH sans adjuvant (T) et avec adjuvant (DY).

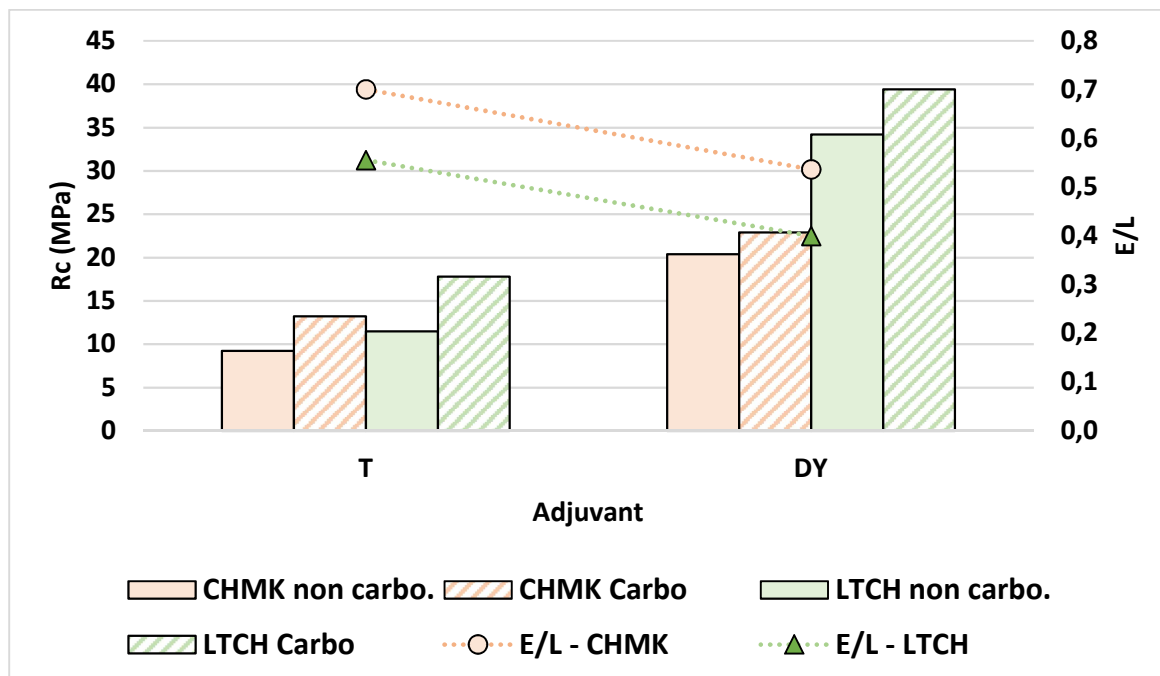


Figure 28 - Résistance en compression des mortiers de sable de CHMK et de LTCH en fonction de l'adjuvant retenu et de la cure (carbonatation accélérée ou pas).

Cette présentation met bien en évidence l'action bénéfique de l'adjuvant DY dosé à 1% de la masse du liant, à la fois sur la réduction d'eau et sur les résistances mécaniques, et plus particulièrement pour le mortier alcali-activé LTCH, ainsi que celle de la carbonatation.

### 2.1.3 Essais sur mortiers de chènevotte

Après avoir déterminé l'adjuvant le plus performant pour les deux liants retenus, nous avons étudié l'effet de l'incorporation de la chènevotte à la place du sable normalisé dans les mortiers. Les formulations sont présentées Tableau 10 pour le mélange CHMK et Tableau 11 pour le mélange LTCH.

L'écart entre la somme de toutes les masses et la masse volumique au moment du démoulage est lié en partie à l'eau rajoutée pour prémouiller la chènevotte (100% de la masse de

chènevotte), qui n'apparaît pas dans la quantité d'eau totale de la formule, et à des problèmes de rendements volumiques.

Tableau 10 - Formulations des mortiers de chènevotte en CHMK.

| Formulation |           |                |                |              |                |      |                    | Démoulage                            |
|-------------|-----------|----------------|----------------|--------------|----------------|------|--------------------|--------------------------------------|
| CODE        | Chaux (g) | Métakaolin (g) | Chènevotte (g) | Adjuvant (g) | Eau totale (g) | E/L  | G/L <sup>(a)</sup> | Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) |
| CHMK        | 300       | 150            | 100            | 4,5          | 240            | 0,53 | 0,22               | 1,097                                |

(a) G/L - rapport granulat végétal/liant

Tableau 11 - Formulations des mortiers de chènevotte en LTCH.

| Formulation |           |             |                |              |                |      |      | Démoulage                            |
|-------------|-----------|-------------|----------------|--------------|----------------|------|------|--------------------------------------|
| CODE        | Chaux (g) | Laitier (g) | Chènevotte (g) | Adjuvant (g) | Eau totale (g) | E/L  | G/L  | Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) |
| LTCH        | 231       | 462         | 100            | 6,9          | 277,00         | 0,40 | 0,14 | 1,390                                |

### 2.1.3.1 Influence de la chènevotte

Dans cette partie nous présentons la fabrication et la conservation des éprouvettes en mortier de chènevotte adjuvanté aussi bien que les résultats des tests mécaniques réalisés.

#### a Fabrication et conservation des éprouvettes

Afin de faciliter la dispersion des agrégats végétaux dans la pâte de liant, la séquence de mélange appliquée, à l'aide d'un malaxeur conforme à la norme NF EN 196-1 (AFNOR, 2016b), a consisté à :

- Peser l'ensemble des constituants ;
- Mouiller la chènevotte à 100% (% en masse de chènevotte) ;
- Mélanger les différents composants du liant avec de l'eau et l'adjuvant pendant environ 2 minutes à vitesse lente jusqu'à ce que le mélange soit homogène ;
- Incorporer les granulats végétaux pré-mouillés ;
- Recommencer le malaxage à vitesse lente durant 2 minutes et ajouter de l'eau supplémentaire, si nécessaire (fonction de la consistance visuelle).

Pour chaque mélange coulé nous avons fabriqué trois éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  dans un moule mis en place à la table à chocs (1 x 60 coups). Les moules ont ensuite été placés dans une pièce à  $20^\circ\text{C} \pm 1$  en protégeant les mortiers de la dessiccation.

Afin d'obtenir une résistance suffisante, les éprouvettes ont été démoulées 7 jours après le coulage. Après démoulage, les éprouvettes ont été pesées et puis conservées dans une salle à  $20^\circ\text{C} \pm 1$  et  $65\% \pm 5 \text{ HR}$  jusqu'à l'échéance d'essai ( $28 \pm 1$  jours).

Comme pour les mortiers de sable, à l'échéance d'essai, les éprouvettes ont été testées en flexion. Après la rupture en flexion chaque moitié des échantillons a été soumise durant 7 jours à un type de cure différent, soit en enceinte de carbonatation accélérée à  $20^\circ\text{C} \pm 1$ ,  $65\% \pm 5 \text{ HR}$  et  $50\% \pm 2$  de  $\text{CO}_2$ , soit en chambre climatique à  $20^\circ\text{C} \pm 1$  et  $65\% \pm 5 \text{ HR}$ .

Après cette période de cure, nous avons réalisé la rupture à la compression sur chaque moitié d'éprouvette selon la norme française EN 196-1 (AFNOR, 2016b).

## b Résultats

Les résultats de résistance mécanique des mortiers de chènevotte sont présentés sur la Figure 29, les barres pleines représentent les bétons non carbonatés (NC) et les barres avec rayures les bétons carbonatés (C). A titre de comparaison on présente aussi les résultats sur les mortiers de sable.

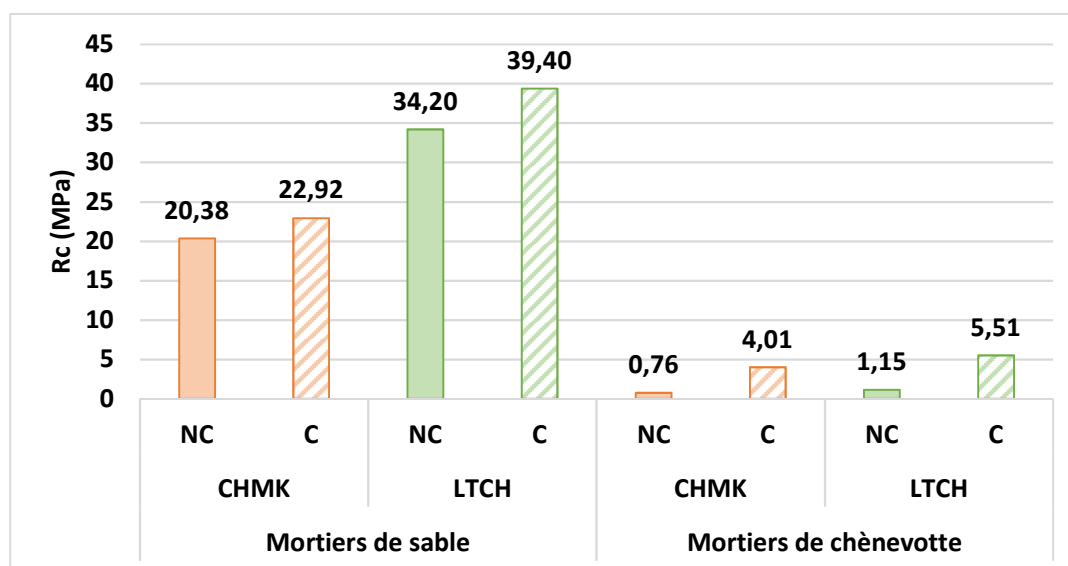


Figure 29 - Résistance mécanique des bétons de chanvre coulés sans prétraitement en fonction du type de liant et de l'adjuvant utilisé.

Pour pouvoir mieux analyser le comportement des mélanges, la Figure 30 présente les résultats de résistance mécanique des mortiers de sable et de chènevotte en fonction des masses volumiques obtenues au moment des essais mécaniques après les deux types de cure : enceinte de carbonatation accélérée (Carbo.) ou chambre climatique (Non carbo.).

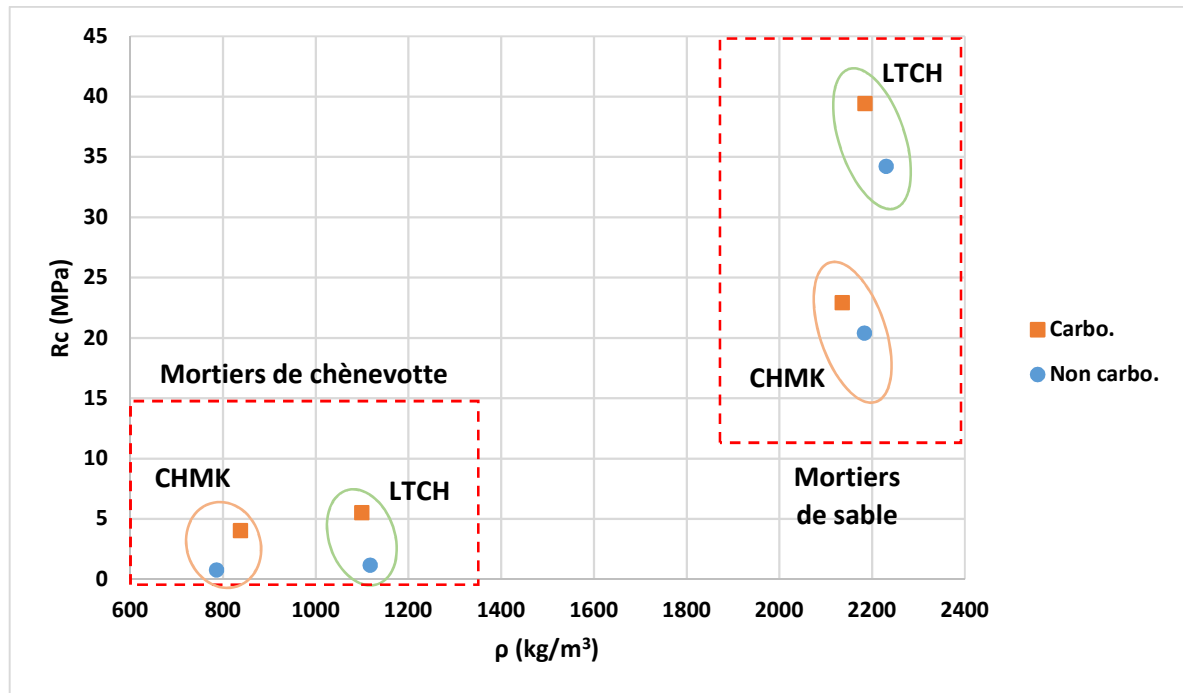


Figure 30 - Résistance en compression des mortiers de sable et de chènevotte en fonction de la masse volumique et selon le type de cure appliqué (carbonatation accélérée ou pas).

Comme indiqué dans la littérature, on constate sur cette figure que l'utilisation de la chènevotte réduit la résistance en compression du matériau. On voit aussi que la carbonatation présente un effet bénéfique sur la résistance en compression pour les deux liants et les deux granulats étudiés (sable et chènevotte).

### 2.1.3.2 Influence du prétraitement

Afin d'améliorer la résistance mécanique des mortiers de chènevotte, et en se basant sur les travaux de (The Manh, 2014), nous avons implémenté le prétraitement de la chènevotte comme expliqué précédemment.

Pour cela les compositions présentées au Tableau 10 et au Tableau 11 ont été adaptées et la procédure de mélange a été modifiée comme décrit ci-après. Les quantités pour les deux étapes de coulage sont présentées dans les Tableau 12 à Tableau 15.

Tableau 12 - Formulations pour le prétraitement des mortiers de chènevotte en CHMK.

| Formulation prétraitement CHMK |           |                |                |              |         |      |      |
|--------------------------------|-----------|----------------|----------------|--------------|---------|------|------|
| CODE                           | Chaux (g) | Métakaolin (g) | Chènevotte (g) | Adjuvant (g) | Eau (g) | E/L  | G/L  |
| CHMK                           | 100       | 50             | 100            | 0            | 240     | 0,66 | 0,67 |

Tableau 13 - Formulations pour le prétraitement des mortiers de chènevotte en LTCH.

| Formulation prétraitement LTCH |           |             |                |              |         |      |      |
|--------------------------------|-----------|-------------|----------------|--------------|---------|------|------|
| CODE                           | Chaux (g) | Laitier (g) | Chènevotte (g) | Adjuvant (g) | Eau (g) | E/L  | G/L  |
| LTCH                           | 77        | 154         | 100            | 0            | 92      | 0,43 | 0,43 |

Tableau 14 - Formulation restante des mortiers de chènevotte en CHMK.

| Formulation restante CHMK |           |                |                |              |                |      |      | Démoulage                            |
|---------------------------|-----------|----------------|----------------|--------------|----------------|------|------|--------------------------------------|
| CODE                      | Chaux (g) | Métakaolin (g) | Chènevotte (g) | Adjuvant (g) | Eau totale (g) | E/L  | G/L  | Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) |
| CHMK                      | 200       | 100            | 0              | 3,0          | 240            | 0,53 | 0,22 | 0,90                                 |

Tableau 15 - Formulation restante des mortiers de chènevotte en LTCH.

| Formulation restante LTCH |           |             |                |              |                |      |      | Démoulage                            |
|---------------------------|-----------|-------------|----------------|--------------|----------------|------|------|--------------------------------------|
| CODE                      | Chaux (g) | Laitier (g) | Chènevotte (g) | Adjuvant (g) | Eau totale (g) | E/L  | G/L  | Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) |
| LTCH                      | 154       | 308         | 0              | 4,6          | 185            | 0,40 | 0,14 | 1,25                                 |

### a Fabrication et conservation des éprouvettes

La séquence de mélange appliquée, à l'aide d'un malaxeur conforme à la norme NF EN 196-1 (AFNOR, 2016b), se fait en deux étapes.

Première étape :

- Peser l'ensemble des constituants ;
- Mouiller la chènevotte à 100% (% en masse de chènevotte) ;

- Mélanger 1/3 des différents composants du liant avec 1/3 de l'eau (sans adjuvants) pendant environ 2 minutes à vitesse lente jusqu'à ce que le mélange soit homogène ;
- Incorporer les granulats végétaux pré-mouillés ;
- Recommencer le malaxage à vitesse lente durant 2 minutes ;
- Vider, le malaxeur, peser les granulats végétaux prétraités avant de les laisser sécher dans la salle d'essai deux jours au minimum en couche d'environ 5 cm.

Deuxième étape :

- Peser les granulats prétraités et les mettre dans le malaxeur en y rajoutant l'eau évaporée (déterminée à partir des comparaisons des masses) ;
- Ajouter dans le malaxeur le liant restant (2/3) pré-mélangé avec l'adjuvant en poudre ;
- Ajouter dans le malaxeur l'eau restante (2/3 de l'eau totale) ;
- Recommencer le malaxage à vitesse lente durant 2 minutes ;
- Ajouter de l'eau supplémentaire si nécessaire.

Pour chaque mélange coulé nous avons fabriqué trois éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  dans un moule mis en place à la table à chocs (1 x 60 coups). Elles ont été ensuite placées dans une pièce à  $20^\circ\text{C} \pm 1$  jusqu'au démoulage en protégeant les mortiers de la dessiccation. Le démoulage a été fait dans la semaine qui a suivi le coulage (soit plus rapidement que pour les mortiers avec chènevotte sans prétraitement).

La même procédure de cure et de rupture à la compression des échantillons précédents est appliquée (cf. partie 2.1.3.1).

## **b Résultats**

La Figure 31 présente les résultats du test de résistance à la compression sur les mortiers de chènevotte avec prétraitement. Les barres pleines représentent les bétons non carbonatés (NC) et les barres avec rayures les bétons carbonatés (C).

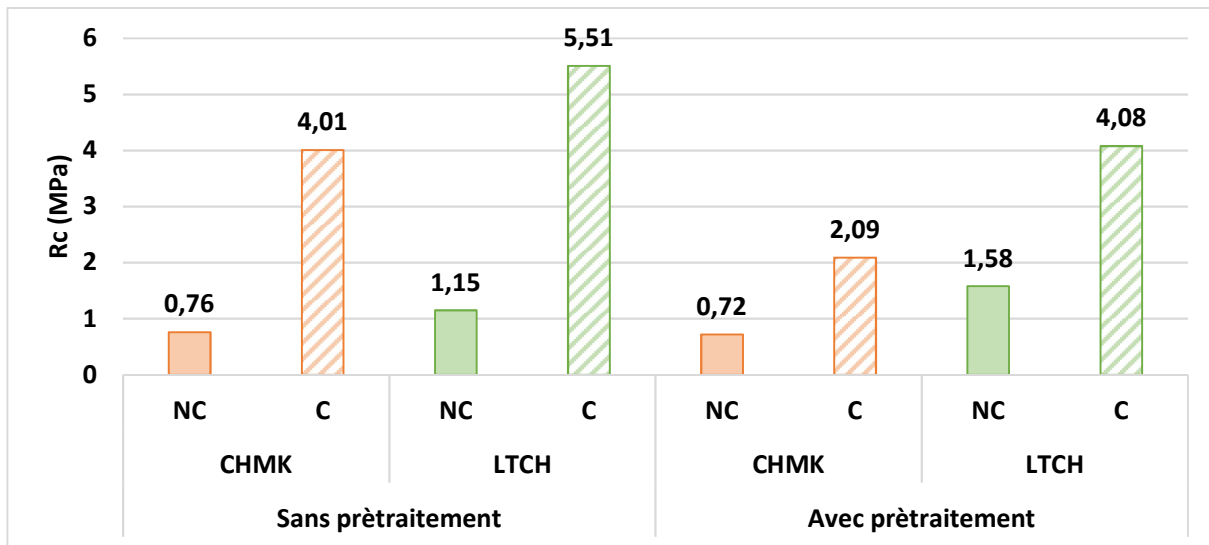


Figure 31 - Résistance mécanique des mortiers de chanvre coulés sans ou avec prétraitement en fonction du type de liant et de la cure (carbonatation accélérée ou pas) pour l'adjuvant retenu.

Les résultats mettent toujours en évidence l'influence positive de la carbonatation pour les deux types de liant sans ou avec prétraitement. Pour les mélanges sans prétraitement, les mortiers de CHMK présentent un gain en résistance mécanique significatif de 428% et ceux en LTCH de 379% par rapport aux mélanges non carbonatés. Pour les mélanges avec prétraitement, le gain est seulement de 190% et 158% pour les mortiers en CHMK et LTCH, respectivement. Ainsi, alors que la procédure de prétraitement semble avoir seulement un léger effet positif pour le mélange LTCH en absence de carbonatation accélérée, on observe un effet défavorable du prétraitement pour les deux liants après carbonatation accélérée.

Ainsi, et contrairement à ce qui était attendu, la procédure de prétraitement n'a pas eu l'effet positif escompté à part pour le mélange LTCH en absence de carbonatation accélérée. Ceci pourrait être lié à la rigidification des granulats de chènevotte avec le prétraitement qui a rendu difficile la mise en œuvre des mortiers de chènevotte dans les moules  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  (masses volumiques des mortiers obtenus plus faibles).

#### 2.1.4 Mélanges retenus

A partir des différents essais réalisés sur mortiers, nous avons retenu les liants suivants pour la réalisation des éléments préfabriqués pour la rénovation des bâtiments étudiés :

- liant CHMK composé de 66,6% de chaux NHL5 de Saint Astier et de 33,3% de métakaolin flash Argicem® avec 1% d'adjuvant en poudre DY ;
- liant LTCH composé de 66,6% de laitier de haut fourneau de Fos/Mer et de 33,3% de chaux NHL5 de Saint Astier, avec 1% d'adjuvant en poudre DY.

Ces liants permettent déjà de diminuer de manière significative l'impact environnemental « Réchauffement climatique » de la chaux hydraulique naturelle si elle était utilisée seule comme liant (-15% à -25% pour CHMK et de -30 à -60% pour LTCH selon les proportions de liant).

Nous avons aussi montré l'intérêt de la carbonatation sur les résistances mécaniques des mortiers de chanvre. Par contre, les essais sur le prétraitement de la chènevotte n'ont pas donné les résultats escomptés en termes de résistance mécanique. Le prétraitement sera tout de même gardé car il permet un démoulage et un séchage plus rapide.

Nous pouvons donc passer à la production des bétons de chanvre à démoulage immédiat.

## **2.2 Caractérisation des bétons de chanvre**

On a observé que l'incorporation des granulats végétaux conduisait à un temps de séchage très élevé (environ 7 jours). Afin de réduire le temps de séchage nous avons décidé de mettre en œuvre les bétons de chanvre préfabriqués avec la méthode de prétraitement des granulats avec démoulage immédiat suite à un vibrocompactage.

### **2.2.1 Fabrication des corps d'épreuve**

Dans cette partie nous présentons la fabrication des éléments préfabriqués utilisés pour la détermination des propriétés mécaniques et hygrothermiques (échantillons banchés ou vibrocompactés) aussi bien que des plaques pour usage en rénovation de logement ancien par l'intérieur à Cahors (uniquement vibrocompactées) comme montré sur la Figure 32.

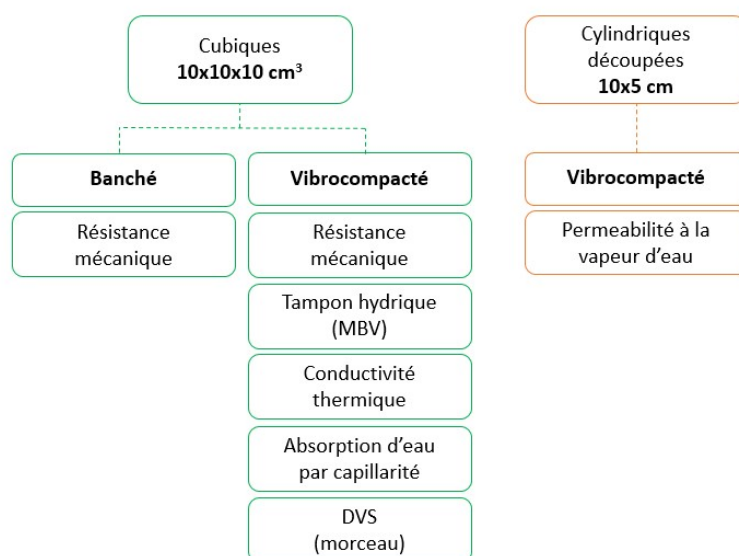


Figure 32 - Echantillons utilisés et essais réalisés pour la détermination des propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre préfabriqué.

### 2.2.1.1 Formulations

La formulation des bétons de chanvre CHMK est celle utilisée pour la fabrication des mortiers de chènevotte 4x4x16 cm<sup>3</sup>. Pour les formulations des bétons de chanvre LTCH, nous avons gardé la même quantité de liant que dans les bétons de chanvre CHMK, contrairement à ce qui avait été fait sur mortiers.

Les quantités pour une gâchée de 75 litres environ sont présentées Tableau 16 jusqu'au Tableau 19. La quantité de béton nécessaire au coulage des plaques étant plus importante, nous avons utilisé un malaxeur à béton à train valseur de 125 litres. Afin d'améliorer la résistance mécanique des mélanges et réduire le temps de séchage, la procédure de prétraitement est appliquée et le mélange final a été adapté comme présenté ci-après.

Tableau 16 - Formulations pour le prétraitement des bétons de chanvre en CHMK.

| Formulation prétraitement CHMK |            |                 |                 |               |          |      |      |
|--------------------------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|----------|------|------|
| CODE                           | Chaux (kg) | Métakaolin (kg) | Chènevotte (kg) | Adjuvant (kg) | Eau (kg) | E/L  | G/L  |
| CHMK                           | 9,0        | 4,5             | 9,0             | 0             | 7,2      | 0,53 | 0,67 |

Tableau 17 - Formulation restante des bétons de chanvre en CHMK.

| Formulation restante CHMK |            |                 |                 |               |                 |      |      |
|---------------------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|------|------|
| CODE                      | Chaux (kg) | Métakaolin (kg) | Chènevotte (kg) | Adjuvant (kg) | Eau totale (kg) | E/L  | G/L  |
| CHMK                      | 18,0       | 9,0             | 0               | 0,27          | 9,6             | 0,80 | 0,35 |

Tableau 18 - Formulations pour le prétraitement des bétons de chanvre en LTCH.

| Formulation prétraitement LTCH |            |              |                 |               |          |      |      |
|--------------------------------|------------|--------------|-----------------|---------------|----------|------|------|
| CODE                           | Chaux (kg) | Laitier (kg) | Chènevotte (kg) | Adjuvant (kg) | Eau (kg) | E/L  | G/L  |
| LTCH                           | 4,5        | 9,0          | 9,0             | 0             | 7,2      | 0,53 | 0,67 |

Tableau 19 - Formulation restante des bétons de chanvre en LTCH.

| Formulation restante LTCH |            |              |                 |               |                 |      |      |
|---------------------------|------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|------|------|
| CODE                      | Chaux (kg) | Laitier (kg) | Chènevotte (kg) | Adjuvant (kg) | Eau totale (kg) | E/L  | G/L  |
| LTCH                      | 9,0        | 18,0         | 0               | 0,27          | 9,6             | 0,80 | 0,35 |

Même si les quantités de liant ont été ajustées et le rapport granulat/liant maintenu constant pour les mélanges en CHMK et en LTCH, tout comme la quantité d'eau, on observe encore des différences de masse volumique entre les mélanges compte tenu des différences de masse volumique des constituants des liants. Ainsi, en toute rigueur, la comparaison des résultats entre liants ne sera possible qu'en les présentant en fonction de la masse volumique « sèche » des échantillons. La masse volumique sèche moyenne des échantillons CHMK est de 550 kg/m<sup>3</sup> et celle des échantillons en LTCH est de 650 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.2.1.2 Prétraitement de la chènevotte

Dans notre cas, pour le prétraitement et pour chaque liant développé, nous avons mélangé 1/3 de la quantité totale de liant avec 1/3 de l'eau de gâchage mais sans mettre d'adjuvant. La séquence de mélange appliquée a consisté à :

- Peser les constituants ;
- Mettre la chènevotte dans le malaxeur et rajouter son équivalent en poids d'eau pendant le malaxage de manière à la pré-mouiller. Poursuivre le malaxage 1 minute ;

- Après 1 minute, introduire lentement le liant en poudre ( $1/3$  de la quantité totale) de manière à bien répartir le liant sur la chènevotte, puis rajouter l'eau ( $1/3$  de la quantité totale prévue dans la formulation) ;
- Poursuivre le malaxage 1 minute puis vider le malaxeur. Peser la quantité de chènevotte prétraitée ;
- Etaler la chènevotte prétraitée sur un polyane sur une épaisseur de 5 cm environ pour une durée minimale de 2 jours.

La Figure 33 montre les granulats végétaux en cours de séchage après la procédure de prétraitement.



Figure 33 - Granulats végétaux CHMK après prétraitement en cours de séchage.

### 2.2.1.3 Malaxage définitif

La procédure de coulage consiste à mélanger les granulats prétraités avec le reste ( $2/3$ ) du liant, l'adjuvant et l'eau ( $2/3$ ). Le granulat prétraité est pesé après coulage et après séchage et la différence de masse est ajoutée dans le malaxeur sous forme d'eau pour compenser l'évaporation. La procédure est la suivante :

- Peser les constituants ;

- Mettre la chènevotte prétraitée dans le malaxeur et rajouter une quantité d'eau équivalente à l'eau perdue pendant le séchage. Poursuivre le malaxage ;
- Après 1 minute, introduire lentement le reste du liant en poudre (2/3 de la quantité totale) et l'adjuvant en poudre de manière à bien les répartir sur la chènevotte, puis rajouter l'eau (2/3 de la quantité totale prévue dans la formulation) ;
- Poursuivre le malaxage 1 minute, puis vider le malaxeur dans une brouette. Protéger le mélange de la dessiccation en le couvrant d'un polyane.

#### 2.2.1.4 Production des cubes banchés

Dans un premier temps nous avons fabriqué des échantillons cubiques de 10 cm de côté en procédé banchage. Trois échantillons par mélange ont été confectionnés en utilisant des moules cubiques classiques pour béton conventionnel. Ce type de coulage entraîne un temps de séchage et des masses volumiques plus élevées (par rapport à la projection et au vibrocompactage) pour les liants utilisés comme cela sera présenté dans la suite.

#### 2.2.1.5 Production des cubes vibrocompactés

Dix échantillons cubiques de 10 cm de côté ont été fabriqués pour chaque formulation testée de manière à pouvoir caractériser le béton de chanvre. Les échantillons ont été mis en place par vibrocompaction. La procédure est la suivante :

- Peser la quantité de béton de chanvre frais permettant d'obtenir la densité voulue après vibrocompactage ;
- Mettre ce matériau dans le moule  $10 \times 10 \times 22 \text{ cm}^3$ , poser au-dessus le piston  $10 \times 10 \times 12 \text{ cm}^3$  ;
- Fermer le dispositif de vibrocompactage puis activer la pression (0,6 MPa) et la vibration durant 15 s. Arrêter la vibration et maintenir la pression durant 15 s ;
- Démouler immédiatement manuellement l'échantillon vibrocompacté.

La Figure 34 présente l'équipement utilisé ainsi que les échantillons obtenus.



(a)



(b)

Figure 34 - (a) Vibrocompacteur avec moule spécifique et (b) échantillons cubiques après démoulage immédiat.

### 2.2.1.6 Production des plaques préfabriquées

20 échantillons prismatiques de 33 cm de côté et 10 cm de hauteur ont été fabriqués pour chaque formulation testée de manière à pouvoir faire les essais *in-situ* à Cahors (plusieurs coulages ont été faits pour une formulation). Les échantillons ont été mis en place par vibrocompaction. La procédure est la suivante :

- Peser la quantité de béton de chanvre frais permettant d'obtenir la densité voulue après vibrocompactage ;
- Mettre ce matériau dans le moule 33x33x25 cm<sup>3</sup> ; poser au-dessus la masse de béton 33x33x15 cm<sup>3</sup> qui servira de piston (masse : 39,8 kg) ;
- Activer la vibration durant 15 s (soit jusqu'à l'obtention des 10 cm de hauteur). Arrêter la vibration et maintenir la pression (bloc de béton) durant 15 s ;
- Démouler immédiatement l'échantillon vibrocompacté.

La Figure 35 montre le dispositif artisanal utilisé et les plaques obtenues après coulage.

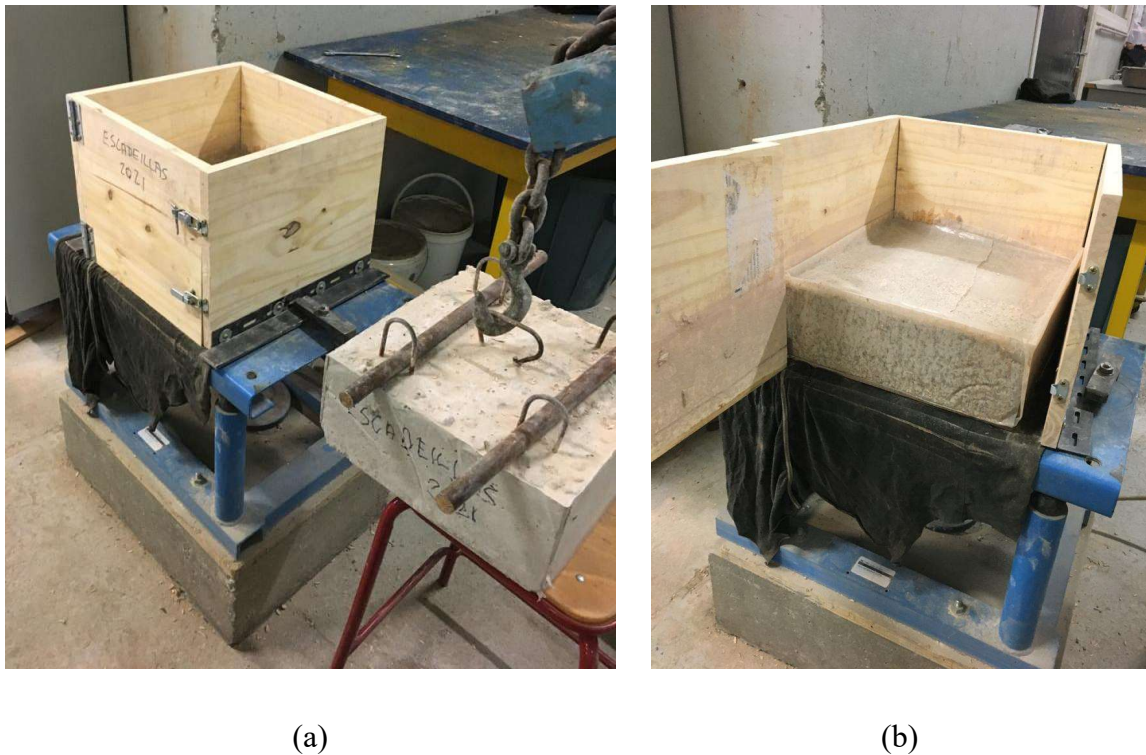


Figure 35 - Production des plaques préfabriquées en béton de chanvre.

#### 2.2.1.7 Conservation des échantillons fabriqués

Les échantillons cubiques banchés ont été démoulés 7 jours après le coulage. Pendant cette période de cure ils sont protégés de la dessiccation avec un film de polyane. Ils ont été ensuite déposés sur une étagère dans une salle non régulée en température et hygrométrie pendant 1 an avant l'essai de caractérisation.

Après démoulage immédiat les échantillons cubiques et les plaques vibrocompactés sont protégés de la dessiccation pendant 7 jours (film de polyane). Ils sont ensuite posés sur des grilles permettant la ventilation sur toutes les faces pendant 7 jours au minimum. Après cette première période de séchage, les échantillons sont déposés sur une étagère (verticalement pour les plaques) dans une salle non régulée en température et hygrométrie avant essai à l'âge de 120 jours pour les cubes, ou mise en place sur site à l'âge de 90 jours (moyenne) pour les plaques.

## 2.2.2 Caractérisation mécanique

Afin de vérifier l'influence du mode de mise en œuvre et l'efficacité de la procédure de prétraitement mise en place nous avons effectué des tests de résistance mécanique sur les échantillons cubiques carbonatés.

### 2.2.2.1 Matériel utilisé

Nous avons testé 3 échantillons cubiques par mélange selon la norme EN 12390-3 (AFNOR, 2019) à l'aide d'une presse hydraulique IGM pilotée en force (capteur de 100 kN) à vitesse de chargement constante égale à 0,1 kN/s comme montré sur la Figure 36. De plus, de manière à approcher le comportement mécanique des différents bétons, nous avons mesuré le déplacement de la traverse inférieure au cours de l'essai. Même si cette mesure ne permet pas d'obtenir le comportement unique du béton de chanvre (du fait d'un élancement de 1, de la prise en compte des écrasements sur appui, *etc.*), les courbes contrainte-déformation relative sont aussi tracées.

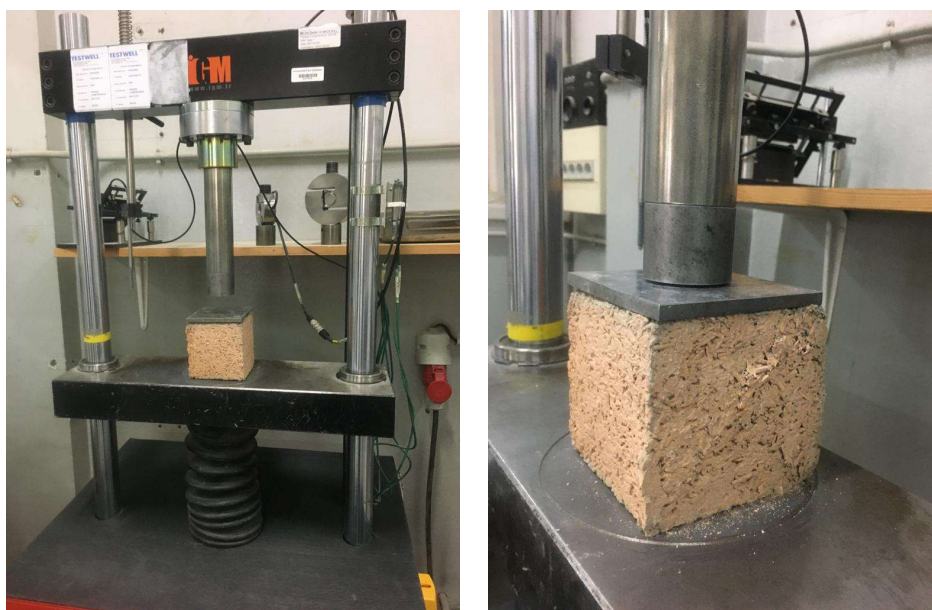


Figure 36 - Essai de rupture à la compression des échantillons cubiques.

### 2.2.2.2 Résultats

Nous présentons dans cette partie les résultats de la caractérisation des cubes banchés et vibrocompactés.

### a Cubes banchés

La Figure 37 présente le comportement mécanique en compression des cubes de béton de chanvre fabriqués en procédé banchage. La masse volumique étant un paramètre influant, une comparaison globale entre les résistances mécaniques et les masses volumiques obtenues pour les deux types de matériau et de coulage sera présentée au final de cette sous-partie.

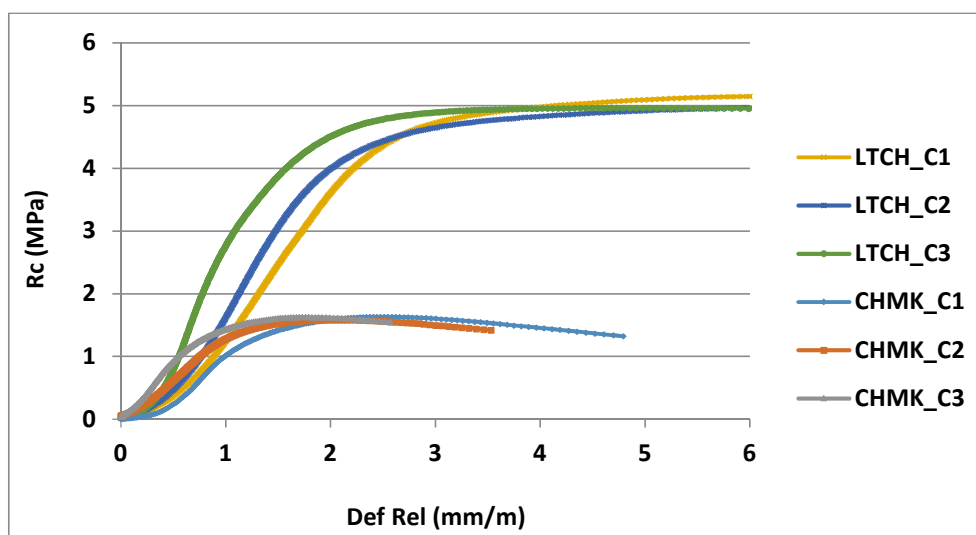


Figure 37 - Comportement mécanique des bétons de chanvre banchés.

Pour une formulation donnée, la figure met en évidence une faible dispersion des valeurs de résistances mécaniques maximales et une dispersion plus importante sur les déformations relatives pour une résistance donnée. Ainsi, les valeurs maximales pour le béton LTCH sont de 5 MPa environ, contre 1,5 MPa pour le béton CHMK, avec un changement de comportement en déformation vers 1,5-2 mm/m pour le béton LTCH et moins de 1 mm/m pour le béton CHMK.

Le rapport G/L des deux mélanges étant le même, les différences entre les résistances mécaniques peuvent être attribuées au type de liant utilisé. Le béton de chanvre en CHMK présente des résistances maximales de l'ordre de 1,5 MPa tandis que celui en LTCH présente des résistances finales d'environ 5 MPa pour les cubes carbonatés. Même si, par rapport à la littérature, nous avons obtenu des résistances mécaniques satisfaisantes pour le mélange en CHMK, les échantillons ne peuvent toujours pas être considérés comme autoporteurs. Par contre, les échantillons banchés en LTCH satisfont au cahier des charges mécaniques.

## b Cubes vibrocompactés

La Figure 38 présente le comportement mécanique en compression des cubes de béton de chanvre fabriqués par vibrocompactage.

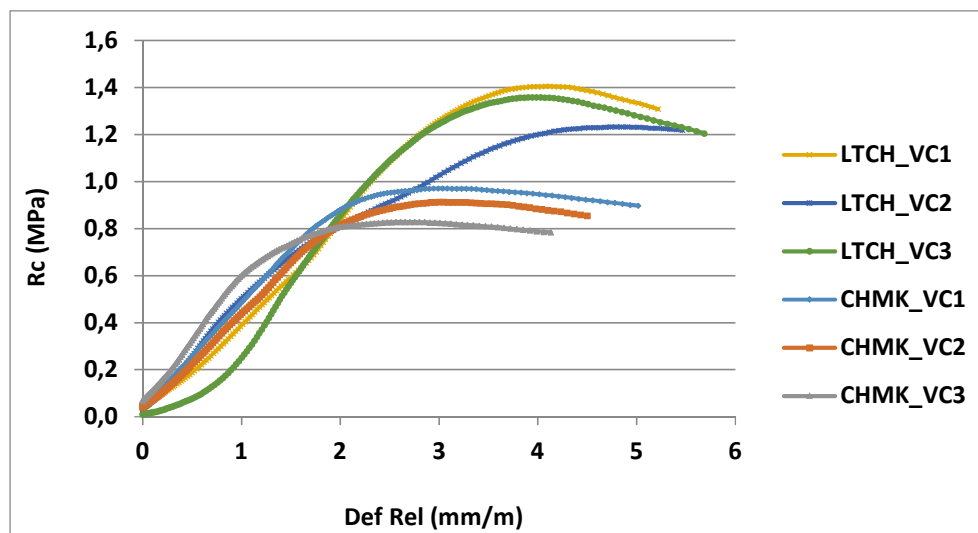


Figure 38 - Comportement mécanique des bétons de chanvre vibrocompactés.

Pour une formulation donnée, la figure met en évidence une légère dispersion des valeurs de résistances mécaniques maximales et toujours une dispersion sur les déformations relatives pour une résistance donnée. Ainsi, les valeurs maximales pour le béton LTCH sont de 1,2-1,4 MPa environ, contre 0,8-1 MPa pour le béton CHMK, avec un changement de comportement en déformation vers 2-3 mm/m pour le béton LTCH et 1-1,5 mm/m pour le béton CHMK.

En comparant les résultats de la Figure 37 et de la Figure 38, on constate que les résistances mécaniques des cubes vibrocompactés sont inférieures à celles obtenues pour les cubes banchés. Ceci est à mettre en relation avec les différences de masses volumiques des bétons testés comme cela est présenté Figure 39 qui montre la variation des résistances mécaniques en compression des cubes banchés et vibrocompactés en CHMK et LTCH en fonction de leur masse volumique au moment de l'essai.

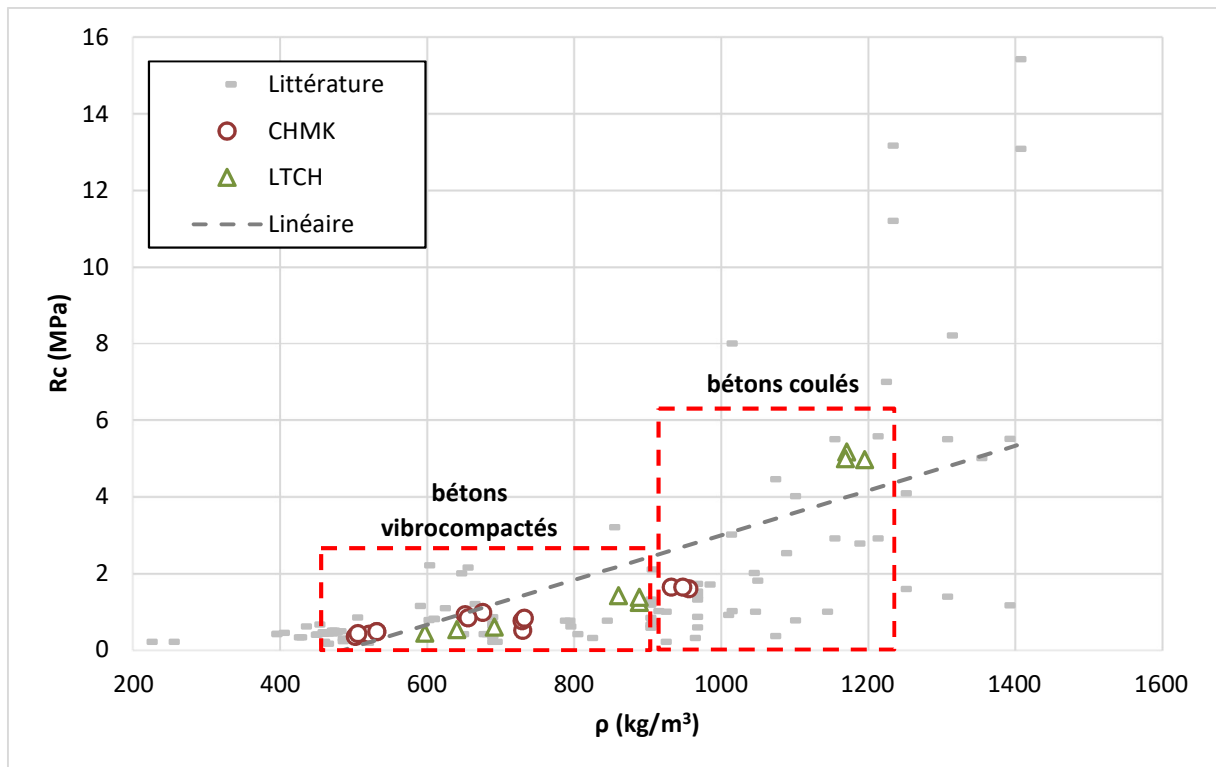


Figure 39 - Résistances mécaniques en compression en fonction des masses volumiques des cubes banchés et vibrocompactés en CHMK et LTCH.

On retrouve sur cette figure la tendance classique rapportée dans la littérature entre la résistance mécanique et la masse volumique des échantillons (voir Figure 12). Deux catégories sont observées : la première est constituée par les mélanges en CHMK et LTCH vibrocompactés et le mélange en CHMK banché, avec des masses volumiques faibles et des résistances inférieures à 1,5 MPa, et la deuxième constituée par les échantillons coulés en LTCH, présentant des résistances mécaniques environ 3 fois plus importantes que la première mais aussi des masses volumiques plus élevées.

Nous avons tout de même choisi le vibrocompactage comme technique de coulage afin de diminuer la quantité de liant des mélanges tout en améliorant les propriétés hygrothermiques au détriment des propriétés mécaniques.

### 2.2.3 Caractérisation hygrothermique

Afin de mieux connaître le comportement hygrothermique des mélanges formulés et d'obtenir des paramètres d'entrée de la modélisation numérique à l'échelle de la paroi, une caractérisation hygrothermique à l'échelle du matériau a été effectuée.

#### 2.2.3.1 Perméabilité à la vapeur d'eau

Les transferts d'humidité au niveau des parois sont la conséquence d'une différence de pression de vapeur entre les ambiances intérieure et extérieure. Au niveau des propriétés hygrométriques des matériaux, la perméabilité à la vapeur d'eau ( $\delta$ ) s'obtient en imposant un gradient de pression partielle de vapeur ( $\Delta p_v$ ) constant et unidirectionnel au travers d'un échantillon d'épaisseur ( $e$ ) qui induit un flux de vapeur d'eau au travers de l'éprouvette ( $G$ ). La densité de flux de vapeur ( $g_{pv}$ ) s'obtient en divisant ce flux par la surface de l'éprouvette.

##### a Méthode

La norme ISO 12572 (AFNOR, 2016a) préconise la méthode gravimétrique ou méthode de la coupelle qui consiste à effectuer des pesées périodiques de l'assemblage coupelle/échantillon afin de déterminer le débit de transmission de vapeur d'eau en régime stationnaire comme montré sur la Figure 40.

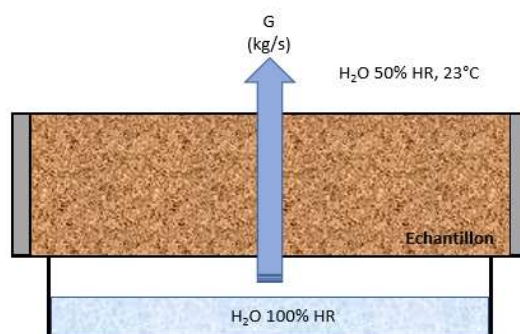


Figure 40 - Schéma du test de la coupelle.

La mesure de la densité de flux de vapeur ( $g_{pv}$ ) en régime permanent conduit à la perméabilité comme indiqué sur l'équation (12).

$$\delta_p = g_{pv} \cdot \frac{e}{\Delta p_v} \quad (12)$$

avec  $\delta_p$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) la perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon sous gradient de pression partielle,  $g_{pv}$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) la densité de flux de vapeur,  $e$  (m) l'épaisseur de l'éprouvette et  $p_v$  (Pa) la pression de vapeur.

On définit aussi le facteur de résistance à la vapeur d'eau ( $\mu$ ) qui correspond à la perméabilité relative du matériau comparée à celle de l'air comme indiqué dans l'équation (13). Il indique de combien la résistance à la diffusion de vapeur d'eau du matériau est supérieure à celle d'une couche d'air stationnaire de même épaisseur à la même température.

$$\mu = \frac{\delta_{\text{air}}}{\delta_p} \quad (13)$$

avec  $\mu$  (-) le facteur de résistance à la vapeur d'eau,  $\delta_{\text{air}}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air et  $\delta_p$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) la perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon sous gradient de pression partielle.

## **b Matériel utilisé**

L'essai de perméabilité à la vapeur d'eau a été effectué à l'aide de l'équipement GRAVITEST qui consiste en une enceinte climatique munie d'une balance couplée. La température d'essai est  $23^\circ\text{C} \pm 1$  et l'humidité relative de l'enceinte est maintenue à  $50\% \pm 5$  HR. Le diamètre des échantillons est de 10 cm et l'épaisseur est de 5 cm. Ils ont été obtenus par vibrocompactage en moule cylindrique. La vitesse de l'air est de 2 m/s et l'intervalle entre les pesées est de 12h. Les échantillons ont été preconditionnés à  $23^\circ\text{C} \pm 1$  et  $50\% \pm 5$  d'humidité relative jusqu'à une variation de masse inférieure à 5% entre trois pesées quotidiennes consécutifs.

## **c Résultats**

Pour chaque mélange étudié, trois éprouvettes ont été utilisées et la moyenne des résultats est présentée sur le Tableau 20.

Tableau 20 - Perméabilité et facteur de résistance à la vapeur d'eau moyen des mélanges étudiés.

|      | Perméabilité à la vapeur d'eau<br>$\delta$ [kg/(m.s.Pa)] | Facteur de résistance à la vapeur d'eau<br>$\mu$ [-] |
|------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| CHMK | $1,25 \text{ E-}10 \pm 0,34 \text{ E-}10$                | $1,56 \pm 0,41$                                      |
| LTCH | $0,88 \text{ E-}10 \pm 0,14 \text{ E-}10$                | $2,21 \pm 0,40$                                      |

On observe que les échantillons en CHMK présentent des perméabilités à la vapeur d'eau plus importantes que les échantillons en LTCH. Il semble donc que la nature de la matrice liante affecte significativement cette propriété hydrique soit directement du fait des différences d'hydratation, soit indirectement du fait des différences de masses volumiques. Cela a été notamment constaté par (Lagouin, 2020).

### 2.2.3.2 Isothermes de sorption/désorption

Comme souligné par (Claude, 2018), il est essentiel de mettre en avant les propriétés hydriques des isolants, c'est-à-dire leur capacité à stocker ou à se laisser traverser par l'humidité, sous forme vapeur ou sous forme liquide. Un système isolant peut réagir de différentes manières à la vapeur d'eau. On parle alors de système perspirant ou fermé au transfert de vapeur, de même que pour le transfert d'eau liquide. Un isolant peut être hydrophobe ou plus ou moins capillairement actif.

#### a Méthode

L'isotherme de sorption exprime la quantité d'humidité que contient un matériau lorsqu'il est en équilibre avec son environnement. La norme ISO 12571 (AFNOR, 2021) préconise la méthode gravimétrique en utilisant les solutions salines saturées pour faire varier les conditions d'humidité relative. Nous avons cependant utilisé la méthode de sorption de vapeur dynamique (*Dynamic Vapour Sorption* - DVS) pour laquelle les variations d'humidité relative sont obtenues en enceinte climatique en mélangeant un gaz sec, de l'azote et de la vapeur d'eau.

L'échantillon de matériau a été placé dans un creuset qui a été pesé en continu par une microbalance comme montré Figure 41.



Figure 41 - Dynamic vapour sorption (DVS).

Les paliers d'humidité relative utilisés sont 0, 20, 40, 70 et 90% pour la sorption et la désorption avec une précision de 0,5% HR. La température est maintenue à  $23^{\circ}\text{C} \pm 0,5$ . Chaque palier d'humidité relative est maintenu jusqu'à l'équilibre de masse, c'est à dire lorsque la variation de masse entre trois pesées consécutives, espacées d'au moins 12 heures, est inférieure à 0,1 % de la masse totale.

(Seng, 2018) a constaté que la méthode DVS présente des dispersions plus importantes par rapport à la méthode des solutions salines saturées principalement pour une HR > 70% où le coefficient de variation évolue entre 18 à 38%. L'auteur attribue ces variations à la différence de taille des échantillons qui pour la méthode DVS peut entraîner des problèmes de représentativité.

Bien que l'éventuel problème de représentativité puisse être un inconvénient, la méthode DVS a l'avantage d'obtenir les résultats dans un délai plus court, environ 3,5 jours, et de manière automatique, tandis que la méthode des solutions salines dure environ 150 jours et nécessite des pesées régulières.

## b Résultats

La Figure 42 présente les courbes de sorption et désorption mesurées pour les bétons de chanvre étudiés.

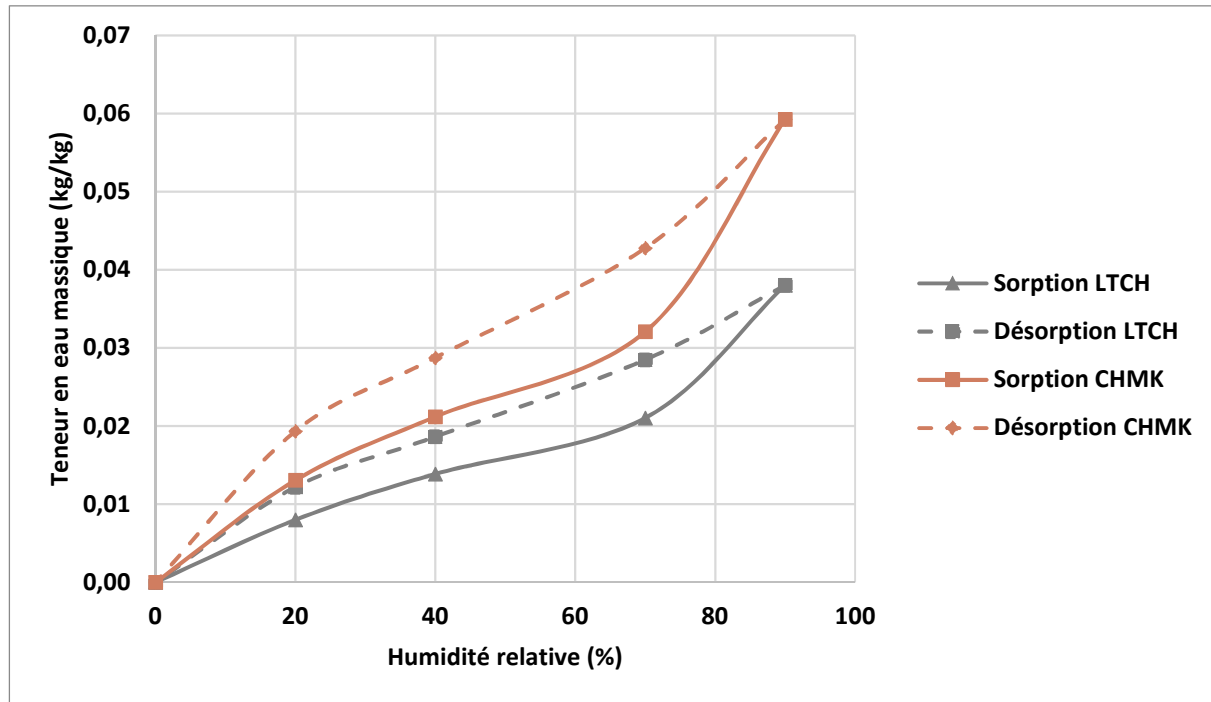


Figure 42 - Courbes de sorption et désorption pour les mélanges étudiés obtenues à partir de la DVS.

On observe que les bétons de chanvre en CHMK ont un pouvoir d'absorption d'eau plus élevé que celui des bétons de chanvre en LTCH. Le granulat végétal étant le même en masse pour les deux matériaux, cette différence peut être attribuée à la matrice liante : la matrice en LTCH présente une porosité ouverte interconnectée inférieure à celle de matrice CHMK et une masse volumique plus élevée.

Selon (Künzel, 1995), une estimation du caractère hygroscopique d'un matériau peut être obtenue par sa teneur en eau d'équilibre, lorsqu'il est maintenu dans une ambiance ayant une humidité relative de 80%, après une phase de séchage. Pour les mélanges étudiés, il a été obtenu par régression linéaire des courbes de sorption et désorption et vaut 0,0305 kg/kg pour le mélange LTCH et 0,0470 kg/kg pour le mélange CHMK, soit une différence de 54%. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus pour la perméabilité à la vapeur d'eau et montre l'influence de la matrice liante sur les propriétés thermohydriques des bétons végétaux.

### 2.2.3.3 Moisture Buffer Value (MBV) ou capacité de tampon hydrique

Une définition robuste de la capacité de tampon hydrique des matériaux et un protocole de test ont été proposés durant le projet NORDTEST de l'Université Technique du Danemark (Rode *et. al*, 2005).

Afin d'avoir à la fois une définition théorique et plus physique, ainsi qu'une méthode de catégorisation simple et facilement compréhensible, une double description du pouvoir tampon hydrique a été choisie : une pratique/expérimentale et une théorique/idéale. Une brève explication de chacune de ces définitions est présentée ci-après.

#### a MBV expérimental

La valeur pratique de la capacité de tampon hydrique ( $MBV_{\text{expérimental}}$ ) indique la quantité d'eau qui est transportée vers l'intérieur ou l'extérieur d'un matériau par surface ouverte, pendant une certaine période de temps, lorsqu'il est soumis à des variations d'humidité relative de l'air ambiant. Lorsque l'échange d'humidité au cours de la période est rapporté par surface ouverte et par pourcentage de variation d'humidité relative, le résultat est le  $MBV_{\text{expérimental}}$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ ] selon l'équation (14).

$$MBV_{\text{expérimental}} = \frac{\Delta_m}{A \cdot (HR_{\text{max}} - HR_{\text{min}})} \quad (14)$$

avec  $\Delta_m$  la variation de masse de l'échantillon [g],  $A$  la surface exposée de l'éprouvette [ $\text{m}^2$ ],  $HR_{\text{max}}$  l'humidité relative maximale [%] et  $HR_{\text{min}}$  l'humidité relative minimale [%].

L'essai consiste à soumettre les échantillons à des cycles d'humidité ambiante variant entre 33% et 75% pendant 16h et 8h respectivement.

(McGregor *et al.*, 2014) ont étudié les différents paramètres influençant le résultat obtenu. Parmi eux, on trouve l'influence de la couche de finition, la vitesse de ventilation dans la chambre climatique déterminant le coefficient de convection massique, l'amplitude de variation de l'humidité relative ainsi que l'épaisseur de l'échantillon. Lorsque l'épaisseur du matériau est supérieure à la profondeur de pénétration hydrique, on s'affranchit de l'influence de l'épaisseur et de l'amplitude entre les deux paliers d'humidité. La profondeur de pénétration peut être obtenue par calcul, mais elle est ainsi souvent surestimée.

La valeur de la profondeur de pénétration est la profondeur selon laquelle l'amplitude de variation de concentration de vapeur ne dépasse pas 1% de celle de sa surface (Arfvidsson, 1999). La profondeur de pénétration  $d_{p,1\%}$  et la diffusivité hydrique  $D_{w(mbv)}$ <sup>1</sup> sont calculées à partir des formules suivantes, définies par (Rode *et al.*, 2005):

$$d_{p,1\%} = 4,61 \frac{D_{w(mbv)} \cdot t_p}{\pi} \quad (15)$$

$$D_{w(mbv)} = \frac{\delta_p P_{vs}}{\rho_0 \left( \frac{d_w}{d_\varphi} \right)} \quad (16)$$

avec  $d_{p,1\%}$  en [m],  $D_{w(mbv)}$  la diffusivité hydrique [ $m^2/s$ ],  $t_p$  la période [s],  $\rho_0$  la masse volumique [ $kg/m^3$ ],  $\delta_p$  la perméabilité [ $kg/(m.s.Pa)$ ],  $P_{vs}$  la pression de vapeur saturante [Pa] et  $\frac{d_w}{d_\varphi}$  la dérivée de l'isotherme de sorption ou capacité hydrique [ $kg.kg^{-1}.\%HR^{-1}$ ].

Une classification des matériaux a été proposée (cf. Figure 43), à la suite du Round Robin Test réalisé sur une large variété de matériaux de construction lors du projet NORDTEST.

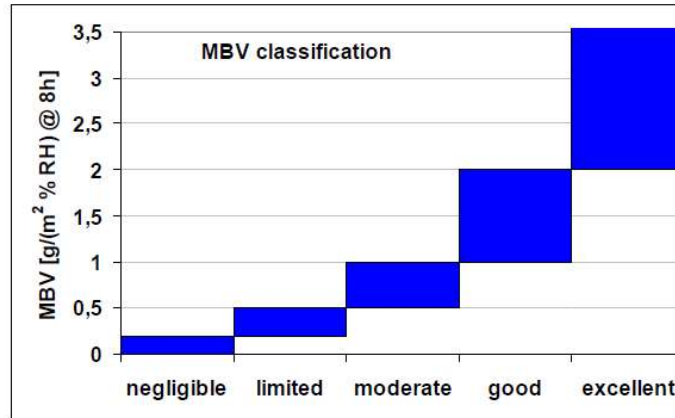


Figure 43 - Classification MBV expérimental selon NORDTEST.

<sup>1</sup> A ne pas confondre : la diffusivité hydrique  $D_{w(mbv)}$  ( $m^2/s$ ) et le coefficient de diffusivité hydrique  $D_w$  ( $m^2/s$ ) reçoivent la même nomenclature (symboles) dans la littérature. Le premier correspond aux transferts de vapeur d'eau et le deuxième aux transferts liquides.

## b Essai

L'essai a été réalisé sur des échantillons cubiques avec une épaisseur de 10 cm et donc de 0,01 m<sup>2</sup> de surface, obtenus par vibrocompaction. La température de l'essai a été maintenue à 23°C ± 1. Les échantillons ont été préconditionnés avec une humidité relative de 50% ± 5 à 23°C ± 1 jusqu'à stabilisation de la masse (variation inférieure à 0,1% entre deux pesées journalières consécutives).

## c Résultats

Pour chaque mélange présenté précédemment trois cubes ont été testés et la moyenne par mélange au cours des trois derniers cycles (9<sup>ème</sup> à 11<sup>ème</sup>) est présentée sur la Figure 44. L'essai est considéré terminé lorsque la variation de masse (moyenne entre le gain de poids pendant l'absorption d'humidité du cycle et la perte de poids pendant le séchage) est inférieure à 5% entre les trois derniers cycles.

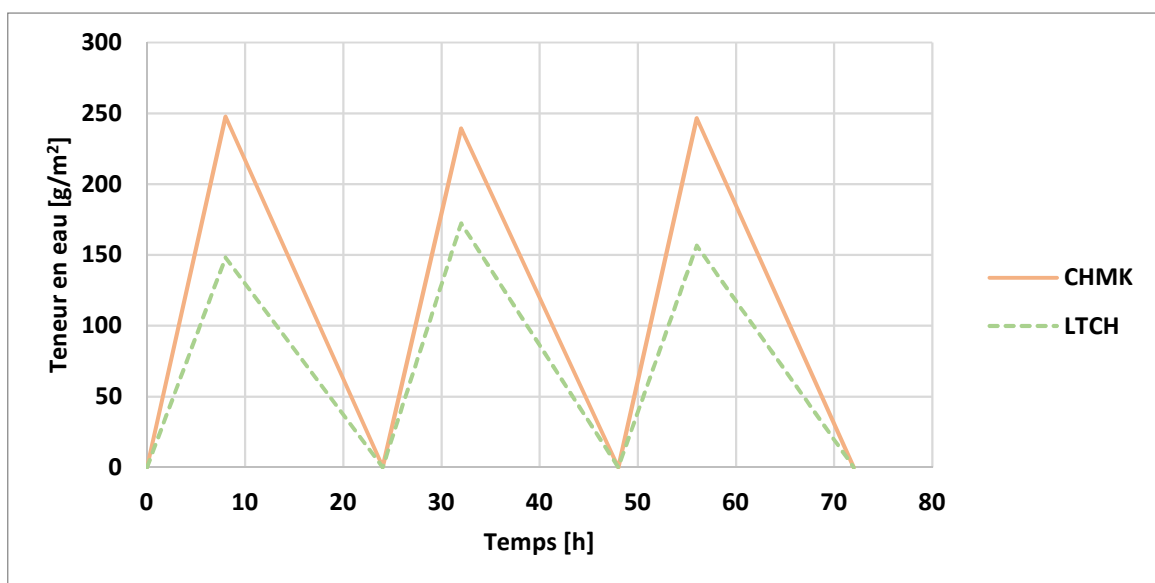


Figure 44 - Humidité adsorbée et désorbée au cours des 9<sup>ème</sup> à 11<sup>ème</sup> cycles de charge (75% HR) et de décharge (33% HR).

On observe que les échantillons en LTCH présentent un MBV expérimental inférieur aux échantillons en CHMK pour un même rapport granulat/liant ce qui peut encore indiquer l'influence du type de liant sur les propriétés hydriques des matériaux biosourcés comme cela a été indiqué par (Ratiarisoa *et al.*, 2016) et (Lagouin, 2020). Les résultats mettent en évidence la forte porosité ouverte interconnectée du mélange CHMK par rapport au mélange LTCH.

#### d MBV idéal

Le MBV<sub>idéal</sub> correspond à un calcul à partir de propriétés à l'état d'équilibre qui permet de prédire la capacité de tampon hydrique d'un matériau.

La description théorique de la capacité de tampon hydrique au niveau du matériau est basée sur l'analogie du transfert de chaleur et d'humidité. Bien connue de la théorie du transport de chaleur, l'effusivité thermique ( $b$ ) exprime le taux de transfert de chaleur sur la surface d'un matériau lorsque la température de surface change. L'effusivité thermique [ $J/(m^2.K.s^{1/2})$ ] ou [ $W.h^{1/2}/(m^2.K)$ ] est définie comme la racine carrée du produit de la masse volumique du matériau ( $\rho$ ), de la capacité thermique spécifique ( $c_p$ ) et de la conductivité thermique ( $\lambda$ ).

En introduisant l'effusivité hydrique ( $b_m$ ), d'une manière similaire à la définition de l'effusivité thermique, la capacité d'un matériau à absorber ou à libérer de l'humidité peut être décrite comme montré par l'équation (17). L'effusivité hydrique constitue une possibilité théorique d'exprimer le taux d'humidité absorbée par un matériau particulier (c'est-à-dire en tant que propriété du matériau) lorsqu'il est soumis à une augmentation soudaine de l'humidité en surface ou dans l'air ambiant.

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \phi}}{p_{vs}}} \quad (17)$$

avec  $\delta_p$  [ $kg/(m.s.Pa)$ ] la perméabilité à la vapeur d'eau,  $\rho_0$  [ $kg/m^3$ ] la masse volumique sèche du matériau,  $u$  [ $kg/kg$ ] la teneur en humidité,  $\phi$  [-] l'humidité relative et  $p_{vs}$  [ $Pa$ ] la pression de vapeur saturante. Hormis  $p_{vs}$ , qui est donné par les conditions d'essai, les autres paramètres de la définition de  $b_m$  sont tous des propriétés de matériau de détermination usuelle (Rode *et al.*, 2005).

Dans le cas de la détermination du MBV, la variation de l'humidité en surface du matériau ou de l'air ambiant n'est pas soudaine. Le protocole impose qu'une humidité élevée soit maintenue pendant 8 heures et une faible humidité soit maintenue pendant 16 heures. Cette variation peut être décrite selon une fonction signal qui correspond à une fonction de répétition constante, en appliquant la théorie de Fourier à l'équation de l'effusivité hydrique ( $b_m$ ).

L'analyse de Fourier permet de prédire le flux d'humidité de surface en fonction du temps pour les cycles d'humidité décrits dans le protocole. La quantité totale d'humidité absorbée ou

libérée est obtenue en intégrant le flux d'humidité selon la surface du matériau. Cette quantité est ensuite normalisée en fonction de la variation de l'humidité relative de surface, ce qu'on appelle  $MBV_{idéal}$ , décrit par l'équation (18).

$$MBV_{idéal} = 0,00568 \cdot b_m \cdot p_{vs} \cdot \sqrt{t_p} \quad (18)$$

avec  $t_p$  la période de temps (un cycle = 8h + 16h = 24h).

Le Tableau 21 présente les valeurs théoriques et expérimentales obtenues pour les mélanges étudiés. Pour le calcul de la capacité hydrique ( $dw/d\phi$ ), une moyenne entre les courbes d'adsorption et de désorption est adoptée car les échantillons sont sensibles à l'immersion à l'eau.

Tableau 21 - Valeurs théoriques et expérimentales de capacité de tampon hydrique en fonction du liant utilisé.

|                                                       | CHMK     | LTCH     |
|-------------------------------------------------------|----------|----------|
| $\mu$                                                 | 1,56     | 2,21     |
| $\frac{dw}{d\phi} [kg \cdot kg^{-1} \cdot \%HR^{-1}]$ | 0,0470   | 0,0305   |
| $Dw [m^2 \cdot s^{-1}]$                               | 8,64E-09 | 9,43E-09 |
| $bm [kg \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1} \cdot s^{0,5}]$    | 1,35E-06 | 9,12E-07 |
| $d_{p1\%} [cm]$                                       | 7,10     | 7,43     |
| $MBV_{idéal} [g \cdot m^{-2} \cdot \%RH^{-1}]$        | 6,21     | 4,16     |
| $MBV_{expérimental} [g \cdot m^{-2} \cdot \%RH^{-1}]$ | 4,82     | 3,53     |

Le mélange en CHMK présente un MBV plus important que celui du mélange en LTCH. Cependant, tous les deux sont classés comme « excellents » selon la classification proposée par le projet NORDTEST. Leur capacité à réguler l'humidité ambiante sera discutée sur la partie de monitoring *in-situ* en prenant en compte les valeurs mesurées sur le banc d'essais à Cahors.

### 2.2.3.4 Conductivité thermique au fil chaud

La conductivité thermique est une grandeur intrinsèque du matériau qui caractérise sa capacité à se laisser traverser par un flux de chaleur. La conductivité dépend de la proportion des différentes phases mais aussi de la géométrie de leur arrangement.

#### a Méthode

Une méthode largement utilisée pour mesurer la conductivité thermique est celle du fil chaud. Le dispositif est constitué d'une sonde à chocs thermiques qui est placée entre deux échantillons identiques du matériau à caractériser comme montré sur la Figure 45 et d'un boîtier d'acquisition électronique.

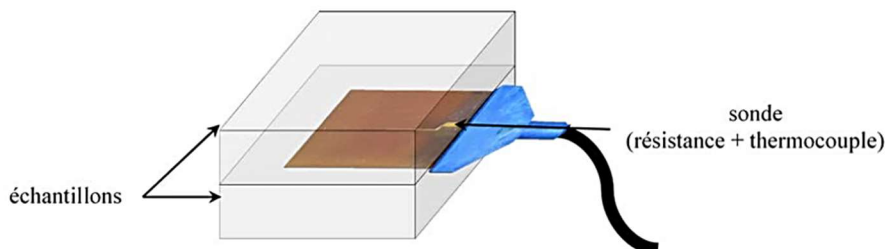


Figure 45 - Dispositif de mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (Lagouin, 2020).

La procédure consiste à produire un faible échauffement local au niveau du matériau (alors considéré à l'équilibre thermique) et à mesurer l'élévation de la température au cours d'un temps très court. L'équation (19) relie la conductivité thermique à l'évolution de la température par rapport au temps.

$$\Delta T = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} (\ln(t) + k) \quad (19)$$

avec  $\lambda$  la conductivité thermique [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $q$  le flux injecté [ $\text{W/m}$ ],  $\Delta T$  la différence de température [ $\text{K}$ ],  $t$  l'instant de l'essai [ $\text{s}$ ] et  $k$  une constante [-].

#### b Résultats

La mesure de la conductivité thermique en fonction de l'humidité relative, effectuée pour chaque mélange sur les échantillons cubiques obtenus par vibrocompaction, est présentée sur la Figure 46.

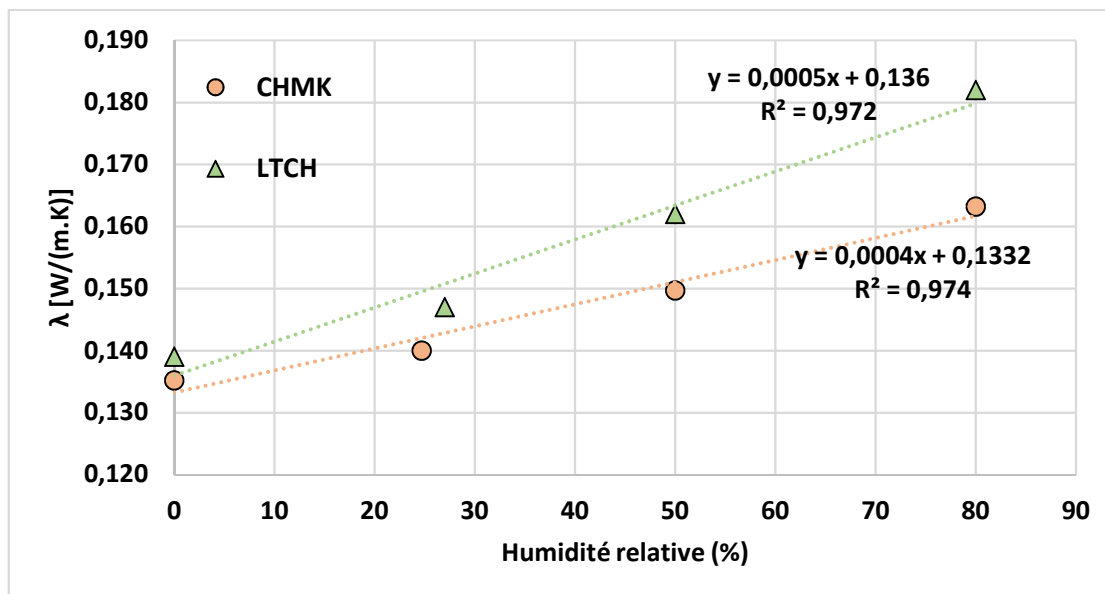


Figure 46 - Influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du fil chaud.

Les résultats montrent que la conductivité thermique augmente linéairement avec l'humidité relative. Cette même tendance est retrouvée dans la littérature (Lagouin, 2020). L'importance du rapport volumique granulat/liant et donc de la masse volumique est mise en évidence. Les bétons de chanvre en LTCH, plus denses, sont légèrement plus conducteurs par rapport aux bétons en CHMK pour toutes les humidités relatives étudiées. Le type de liant semble contribuer de façon mineure à la conductivité thermique (écart maximal de 0,02 W/(m.K)) comme montré par (Lagouin, 2020).

#### 2.2.3.5 Absorption d'eau par capillarité

Le test de capillarité consiste à mesurer l'absorption d'eau dans le matériau sous l'effet des forces capillaires provoquées par le contact avec l'eau liquide.

##### a Méthode

La méthode d'essai est décrite par la norme ISO 15148 (BSI, 2003). Les éprouvettes sont préalablement séchées jusqu'à stabilisation de la masse (variation inférieure à 1% sur 24 heures) et ensuite enduites latéralement avec de l'aluminium autocollant afin de limiter l'évaporation latérale et de favoriser un transfert liquide unidirectionnel. Elles sont enfin immergées dans l'eau sur 5 millimètres environ afin d'assurer l'alimentation capillaire par une pellicule d'eau.

Le volume cumulé absorbé est alors obtenu par pesées successives (variation de masse des éprouvettes en fonction du temps).

Selon (Scheffler, 2008), pour les matériaux homogènes et isotropes, l'absorption d'eau se traduit par deux phases distinctes, comme montré sur la Figure 47, courbe (a). La première est caractérisée par une augmentation linéaire de la masse par rapport à la racine carrée du temps. La transition de la première à la deuxième phase se produit lorsque le front d'humidité atteint la face supérieure de l'échantillon. Une augmentation supplémentaire de la masse est due aux processus de redistribution impliquant la dissolution de l'air piégé et se déroule généralement très lentement.

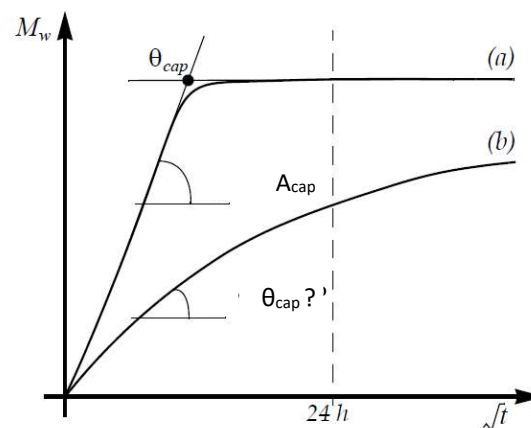


Figure 47 - Essai d'absorption capillaire sur un matériau homogène (a) et un matériau hétérogène (b) d'après (Scheffler, 2008).

A partir de cette expérience, le coefficient d'absorption d'eau et la teneur en humidité capillaire peuvent être calculés. Le coefficient d'absorption d'eau en  $A_{cap}$  ( $\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{s}})$ ) est déterminé comme la pente de l'augmentation de masse en fonction de la racine carrée du temps pendant la première phase de l'expérience.

La teneur en humidité capillaire dans  $\theta_{cap}$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) est généralement prise comme la teneur en humidité qui est atteinte lorsque la pente de l'augmentation de masse s'écarte du comportement linéaire dans la racine carrée de l'échelle de temps ou comme la teneur en humidité à la fin de l'expérience.  $\theta_{cap}$  est défini comme la plus haute teneur en eau atteinte au cours de l'essai d'absorption capillaire.

La cinétique évolue linéairement en fonction de la racine carrée du temps, selon la seconde loi de Fick (phénomène diffusif) comme montré sur l'équation (20).

$$\frac{dw}{S} = A_{cap} \sqrt{t} \quad (20)$$

Avec  $w$  la masse d'eau en kg,  $S$  la surface de l'échantillon en  $m^2$ ,  $A_{cap}$  le coefficient d'absorption capillaire en  $kg.m^{-2}.h^{-1/2}$ , et  $t$  le temps en h.

## b Résultats

La Figure 48 rapporte les résultats des tests d'absorption capillaire réalisés sur 96h pour les deux mélanges étudiés,  $A_{cap}$  et  $\theta_{cap}$  sont obtenus à l'issue de ce test. La durée plus longue de l'essai a été choisie car à l'issue des 24 premières heures le  $\theta_{cap}$  n'était pas encore atteint. Pour le calcul d' $A_{cap}$  nous avons négligé la mesure effectuée à 0 heure afin d'obtenir un coefficient plus réaliste.

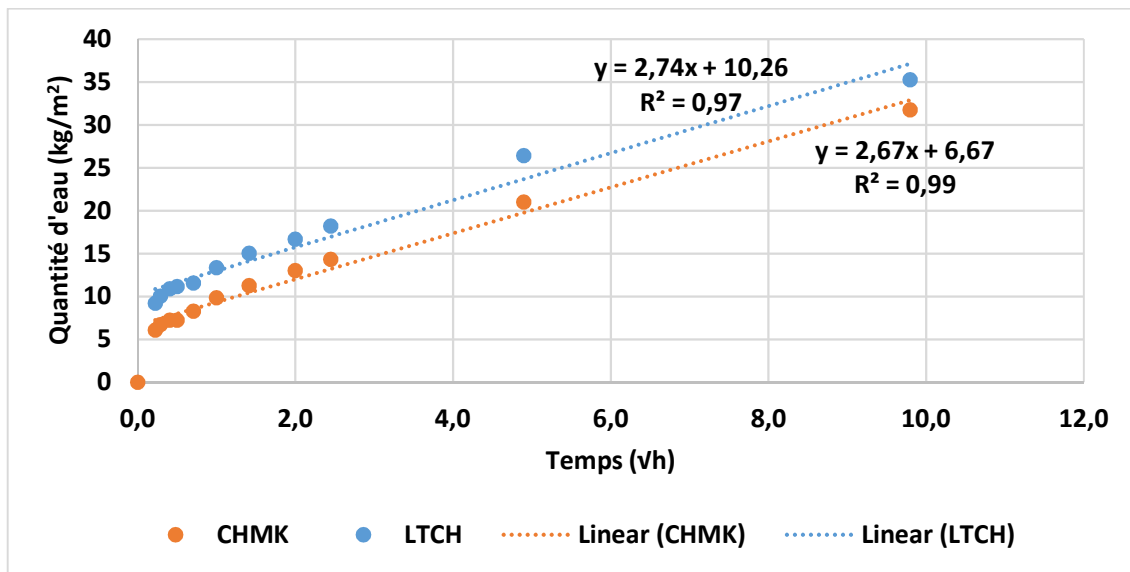


Figure 48 - Résultats des essais d'absorption capillaire.

Globalement, les échantillons en LTCH absorbent plus d'eau que les échantillons en CHMK. Comme les deux mélanges possèdent le même ratio massique agrégat végétal/liant, nous attribuons la différence à la matrice liante. La matrice LTCH présentant un rapport E/L plus petit que la matrice CHMK, et donc un réseau de pores plus fins, elle absorberait donc plus d'eau par capillarité par rapport à la matrice en CHMK.

Les résultats du test d'absorption par capillarité sont réunis dans le Tableau 22. Les unités présentées sont celles utilisées comme entrées du logiciel Delphin 6.1.  $\theta_{\text{sat}}$  correspond à une quantité d'eau occupant toute la porosité ouverte du matériau. La porosité ouverte a été calculée en fonction des masses volumiques des liants, selon la même approche que celle utilisée par (Claude 2018).

Tableau 22 - Propriétés de transferts hydriques issues du test de capillarité.

| Mélange | $A_{\text{cap}}$<br>[kg/(m <sup>2</sup> √h)] | $\theta_{\text{cap}}$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\theta_{\text{sat}}$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] |
|---------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| CHMK    | 2,67                                         | 210,02                                        | 730                                           |
| LTCH    | 2,74                                         | 264,27                                        | 725                                           |

La structure du système poral des matériaux de construction détermine une grande partie de leurs propriétés hygrothermiques. La structure porale complexe des bétons de chanvre nous a amené à réaliser les tests présentés ci-avant afin d'obtenir les caractéristiques hygrothermiques des différents matériaux étudiés.

D'une manière générale, les résultats montrent que les propriétés hygrothermiques mesurées sont dépendantes de l'état hygrothermique des matériaux. Les bétons de chanvre sont considérés comme des matériaux hygrothermiques et les deux mélanges testés sont capillaires.

L'ensemble des grandeurs déterminées dans cette partie permet d'enrichir les bases de données quant aux caractéristiques physiques des matériaux et de mieux comprendre les phénomènes de transfert et de stockage observés au cours de l'instrumentation *in-situ* (cf. Chapitre 3). Ces données seront également utilisées comme données d'entrées du modèle de transferts couplés utilisé dans la suite de cette étude (cf. Chapitre 4).

## 2.3 Analyse microstructurale

Dans cette partie nous présentons l'analyse au niveau microstructural. L'objectif est de comprendre l'influence de l'adjuvant et des extraits solubles de la chènevotte sur la prise des mélanges étudiés.

### 2.3.1 Matériaux et méthodes

#### 2.3.1.1 Matériaux

##### a Caractérisation de l'hydratation des liants bas carbone

Afin de caractériser au mieux les liants bas carbone développés dans cette thèse et leur hydratation, nous avons confectionné des pâtes. Pour l'étude des pâtes CHMK, le liant est composé en masse de 2/3 de chaux hydraulique naturelle NHL 5 et 1/3 de métakaolin flash. Pour l'étude des pâtes LTCH, le liant est composé en masse de 2/3 de laitier de haut fourneau et 1/3 de chaux hydraulique naturelle NHL 5. Nous avons aussi confectionné des pâtes avec ces liants et l'adjuvant sélectionné dans la première étape de formulation (rapport Adjuvant/Liant = 0,01).

L'eau utilisée est de l'eau déminéralisée et le rapport eau/liant (E/L) a été ajusté selon le type de liant et la présence de l'adjuvant pour maintenir la même consistance de la pâte et éviter ainsi toute ségrégation (E/L = 0,70 pour les pâtes de CHMK non-adjuvantées et E/L = 0,53 pour les pâtes adjuvantées ; E/L = 0,56 pour les pâtes de LTCH non-adjuvantées et E/L = 0,40 pour les pâtes adjuvantées).

##### b Interactions pâtes / chènevotte

Pour étudier les interactions entre les liants et la chènevotte, nous avons confectionné des pâtes en remplaçant l'eau déminéralisée par de l'eau obtenue après mise en contact avec la chènevotte.

Quatre solutions de chènevotte ont été fabriquées selon les concentrations présentées Tableau 23. La chènevotte est mise pendant 24 heures en contact avec l'eau déminéralisée (Figure 49), puis la solution est filtrée avant chaque essai.

Tableau 23 - Concentrations des solutions de chènevotte.

| Solutions de Chènevotte |         |                |                   |
|-------------------------|---------|----------------|-------------------|
| Solution                | Eau (g) | Chènevotte (g) | Concentration (%) |
| S0                      | 800     | 0              | 0                 |
| S1.25                   | 800     | 10             | 1,25              |
| S3.75                   | 800     | 30             | 3,75              |
| S6.25                   | 800     | 50             | 6,25              |
| S10                     | 800     | 80             | 10                |



Figure 49 - Solutions de chènevotte.

Le Tableau 24 présente la nomenclature des mélanges analysés dans cette partie de la thèse. Les 4 premières lettres correspondent au type de liant utilisé, la lettre « S » indique le type de solution de chènevotte utilisée (selon le tableau précédent), et la lettre « A » à la fin de cette nomenclature indique la présence de l'adjuvant.

Tableau 24 - Nomenclature des mélanges analysés.

| Mélanges CHMK | Mélanges LTCH |
|---------------|---------------|
| CHMKS0        | LTCHS0        |
| CHMKS0A       | LTCHS0A       |
| CHMKS1.25     | LTCHS1.25     |
| CHMKS1.25A    | LTCHS1.25A    |
| CHMKS3.75     | LTCHS3.75     |
| CHMKS3.75A    | LTCHS3.75A    |
| CHMKS10       | LTCHS10       |
| CHMKS10A      | LTCHS10A      |

### 2.3.1.2 Méthodes

#### a Fabrication et conservation des éprouvettes

Les pâtes ont été confectionnées manuellement et placées ensuite dans des tubes en polyéthylène étanches et conservés à  $20^{\circ}\text{C} \pm 1$  jusqu'à échéance d'essai.

#### b Diffraction de Rayons X

Les analyses par diffraction de rayons X (DRX) ont été effectuées avec un diffractomètre de type Bruker D8 Advance équipé d'une anticathode en cuivre ( $\text{CuK}\alpha$ ). La tension était de 40 kV et le courant de 40 mA. Toutes les analyses ont été réalisées de  $4$  à  $70^{\circ}$  sur des matériaux préalablement broyés au mortier d'agate au passant à  $80\text{ }\mu\text{m}$ .

#### c Analyses thermogravimétriques

L'analyse thermogravimétrique (ATG) a été réalisée à l'aide d'un équipement de la marque Mettler Toledo TGA 2. Le principe consiste à mesurer la perte de masse d'un échantillon placé dans un creuset, lors de la montée en température jusqu'à  $1000^{\circ}\text{C}$  avec une rampe de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Préalablement à l'essai, les échantillons ont été broyés au mortier d'agate au passant à  $80\text{ }\mu\text{m}$  puis lyophilisés de manière à éliminer l'eau libre avec un minimum d'artefact.

Les résultats sont ensuite dérivés grâce au logiciel STARe intégré pour obtenir la courbe différentielle de l'analyse thermogravimétrique (DTG) et identifier plus facilement la nature des hydrates décomposés.

#### d Calorimétrie isotherme

L'évolution du flux thermique obtenue avec les calorimètres permet d'avoir un aperçu des réactions chimiques au fil du temps. Nous cherchons ainsi à comprendre les interactions entre le liant, les extraits solubles de chènevotte et l'adjuvant.

L'équipement utilisé est un calorimètre isotherme TAM Air de conduction de chaleur comprenant 8 voies contenues dans une enveloppe thermostatée. La limite de détection est de  $4\text{ }\mu\text{W}$  et la précision de  $\pm 20\text{ }\mu\text{W}$ . Chaque voie du calorimètre contient une voie de mesure pour l'échantillon et une seconde pour la référence qui permet de réduire le bruit et corriger les artefacts de mesure et de variation de température. La chaleur (créée par exemple par des réactions exothermiques d'hydratation) est comparée entre l'échantillon et la référence, les deux

présentant la même capacité thermique initiale, dans un environnement conservé à une température constante de 20°C.

## 2.3.2 Résultats

### 2.3.2.1 Caractérisation de l'hydratation des liants bas carbone

#### a Diffractométrie de rayons X

Nous présentons Figure 50 l'analyse DRX à l'âge de 7 jours des pâtes CHMK et LTCH confectionnées avec de l'eau déminéralisée.

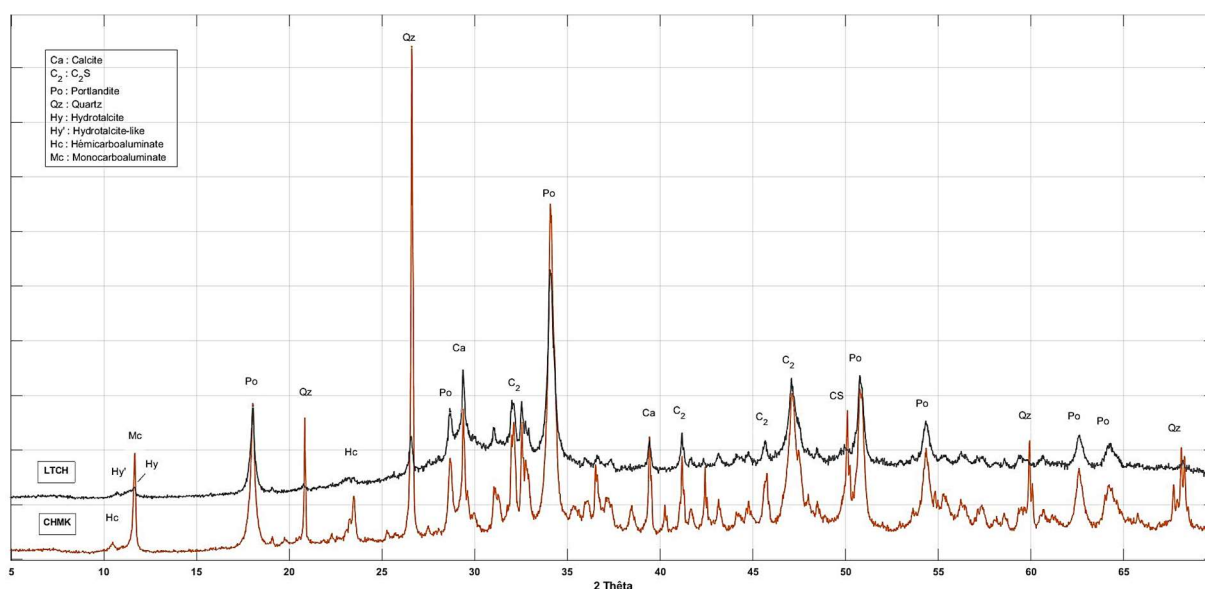


Figure 50 - Diffractogrammes de rayons X pour les mélanges CHMK et LTCH.

Pour la pâte CHMK, on peut voir :

- le pic du quartz, qui est présent en quantité importante dans le métakaolin flash utilisé ;
- les pics de portlandite (ou chaux éteinte) venant de la chaux hydraulique naturelle utilisée mais aussi de la réaction d'hydratation de la partie hydraulique de la chaux ;
- les pics de calcite venant de la chaux hydraulique naturelle utilisée et aussi, potentiellement, de la carbonatation de la portlandite pendant la phase d'analyse ;

- les pics de monocarboaluminates et d'hémicarboaluminates de calcium hydratés venant de la réaction entre le métakaolin et la portlandite ;
- des pics résiduels de  $C_2S$ .

Pour la pâte LTCH, on peut voir :

- les pics de portlandite (ou chaux éteinte) venant de la chaux hydraulique naturelle utilisée mais aussi de la réaction d'hydratation de la partie hydraulique de la chaux ;
- les pics de calcite venant de la chaux hydraulique naturelle utilisée et aussi, potentiellement, de la carbonatation de la portlandite pendant la phase d'analyse ;
- les pics d'hydrotalcite venant de la réaction entre le laitier et la portlandite ;
- des pics résiduels de  $C_2S$ .

Les différences entre les deux diagrammes portent surtout sur les pics des constituants (quartz pour CHMK), la différence d'intensité des pics de portlandite (plus grands pour CHMK à relier avec la plus grande teneur en chaux utilisée dans ce liant) et sur les produits de réaction cristallisés (carboaluminates pour CHMK et hydrotalcite pour LTCH).

La formation des phases hydrotalcite et ses polymorphes (hydrotalcite-like) est souvent observée dans la littérature sur l'hydratation des laitiers. L'hydrotalcite a une structure d'hydroxyde en couches doubles lamellaires, qui contient généralement des anions  $CO_3^{2-}$  dans ses espaces intercouches (Bookin et Drits, 1993). Les anions peuvent être facilement échangés avec d'autres anions tels que  $OH^-$  dans des solutions ioniques, ce qui entraîne des variations dans les espacements intercouches. (Haha *et al.*, 2011), qui ont étudié l'influence de l'effet du MgO sur l'hydratation d'un laitier activé par un hydroxyde (NaOH), ont observé la formation de C-A-S-H et d'une phase hydrotalcite-like dans tous les échantillons pour une teneur en MgO du laitier variant entre 8 et 13% en masse à l'âge de 28 jours. (Seo *et al.*, 2021), qui ont étudié l'activation d'un laitier contenant 3,5% de MgO par la chaux aérienne remplacée en teneur de 5, 10 et 15% en masse, ont rapporté la présence de C-S-H, Portlandite et hydrotalcite à l'âge de 28 jours. De même, (Kim *et al.*, 2013), qui ont activé un laitier contenant 4,23% de MgO avec 6,25% de CaO et de  $Ca(OH)_2$  comme activateurs, ont obtenus du C-S-H, de la Portlandite et de l'hydrotalcite indépendamment du type d'activateurs utilisé. Ces auteurs reportent aussi la

présence de Stratlingite (ou Gehlénite) pour le mélanges activés par  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à l'âge de 14 et 28 jours.

La formation d'hémicarboaluminates et de monocarboaluminates dans les mélanges chaux-métakaolin a aussi été décrite par de nombreux auteurs (Ubbriaco and Tasselli 1998 ; Magniont 2010).

## b Thermogravimétrie

La Figure 51 présente les analyses DTG à l'âge de 7 jours des pâtes CHMK et LTCH confectionnées avec de l'eau déminéralisée avec et sans adjuvant.

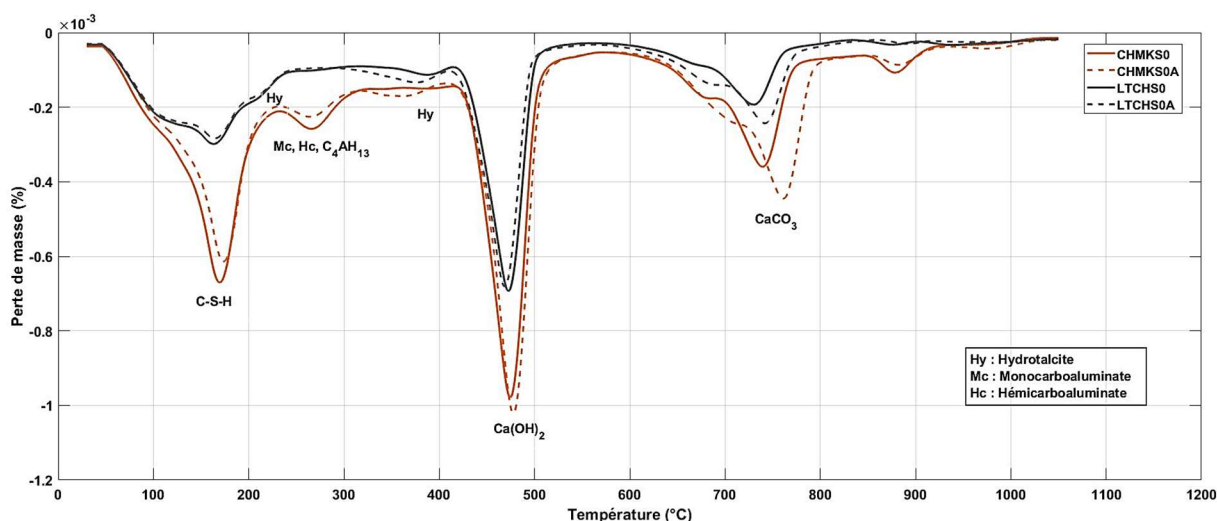


Figure 51 - Analyse thermogravimétrique des pâtes de CHMK et LTCH avec et sans adjuvant à l'âge de 7 jours.

Ce diagramme met en évidence des différences notables entre les deux liants :

- Pour les pâtes sans adjuvant (courbes en trait plein), les pics sont beaucoup plus prononcés pour CHMK. Les pics plus importants au niveau de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et de  $\text{CaCO}_3$  peuvent s'expliquer par une teneur en chaux hydraulique plus élevée dans cette pâte. Le pic plus important au niveau des C-S-H est la conséquence d'une plus grande réactivité du métakaolin au jeune âge par rapport au laitier. Enfin, le pic associé aux carboaluminates vers 270°C n'est présent que pour cette pâte, comme montré précédemment par DRX ;

- Pour les pâtes avec adjuvant (courbe en traits pointillés), on note peu de différence par rapport aux pâtes sans adjuvant à l'exception du pic correspondant à la décarbonatation de la calcite (entre 600 et 800°C) qui apparaît plus important et plus décalé vers les températures plus élevées pour CHMK.

Ces résultats sur le mélange CHMK sont conformes à ceux trouvés par (Bakolas *et al.*, 2006) qui ont analysé l'hydratation du mélange métakaolin-chaux pour trois différents rapports MK/CH, à savoir 0,5, 1 et 2, le dernier correspondant au rapport utilisé dans cette thèse.

### c Microcalorimétrie

La Figure 52 présente le suivi par microcalorimétrie des pâtes durant les 7 premiers jours (168 heures) d'hydratation.

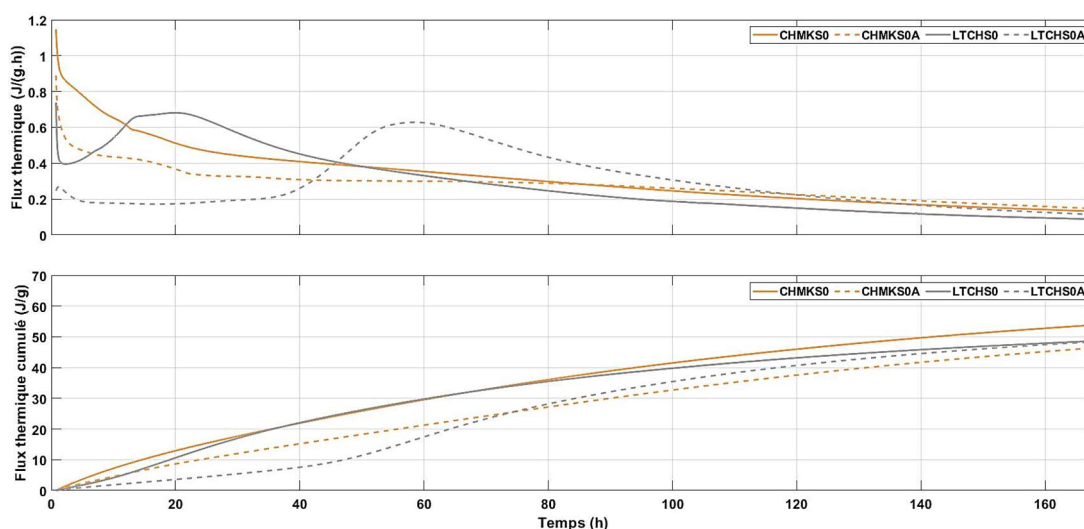


Figure 52 - Suivi par microcalorimétrie des pâtes de CHMK et LTCH avec et sans adjuvant à l'âge de 7 jours (en haut flux thermique et en bas flux thermique cumulé).

Les flux thermiques mesurés (graphe du haut) sont très faibles ce qui est une des conséquences du type de liant utilisé (liant à base de chaux hydraulique avec uniquement du C<sub>2</sub>S réputé pour sa faible vitesse de réaction). On peut toutefois voir des différences significatives d'allure de courbes entre les deux liants et en présence ou non d'adjuvant (lignes pointillées). L'adjuvant abaisse le flux thermique (CHMK) ou retarde son apparition d'une quarantaine d'heure (LTCH).

Par contre, comme le montre le graphe du bas, le flux thermique cumulé est juste ralenti en présence d'adjuvant, et la valeur finale à 168 h est peu affectée (et même légèrement supérieure pour CHMK). On a donc affaire uniquement à un effet retard.

### 2.3.2.2 Etude des interactions liants / chènevotte

Dans la suite nous présentons les résultats des tests de diffractométrie de rayons X, thermogravimétrie et calorimétrie isotherme en fonction des solutions de chènevotte obtenues par immersion des granulats végétaux comme expliqué précédemment. L'objectif est de mieux comprendre les interactions entre les différents liants et les extraits solubles de la chènevotte.

#### a Diffractométrie de rayons X

La Figure 53 présente les résultats de DRX à 7 jours pour les mélanges en CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte en différentes concentrations (cf. Tableau 23) et la Figure 54 présente la même analyse pour les mélanges en LTCH.

On observe que, à 7 jours et pour les deux types de liant utilisés, les extraits solubles n'influencent pas les produits d'hydratation : on garde les mêmes produits avec qualitativement les mêmes concentrations (hauteurs de pics).

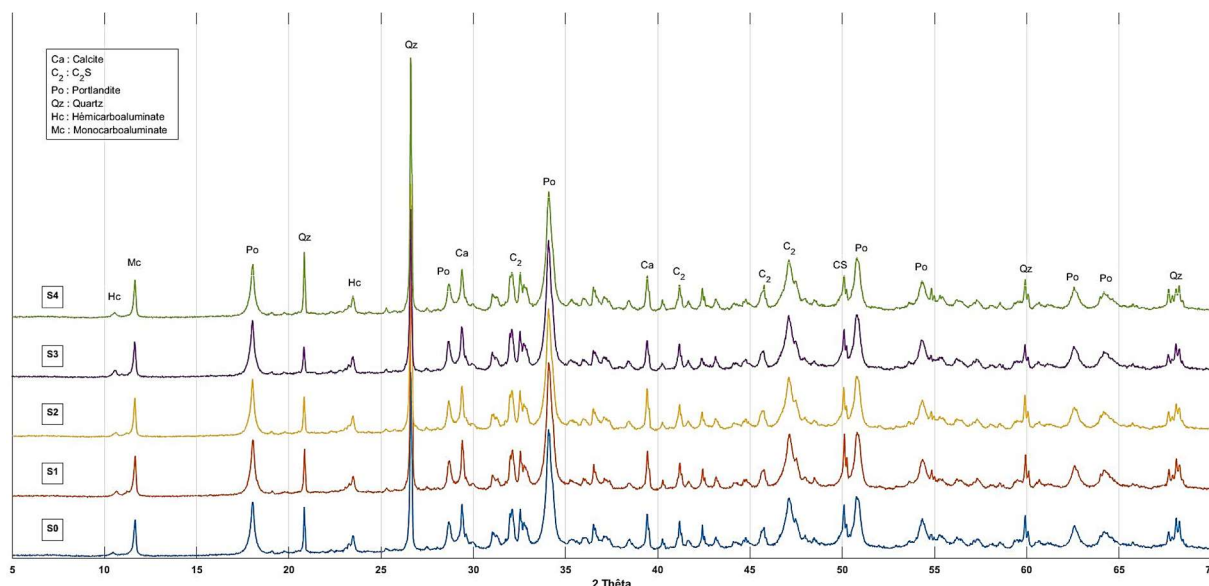


Figure 53 - Diffractogramme de rayons X pour les mélanges CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte aux différentes concentrations à l'âge de 7 jours.

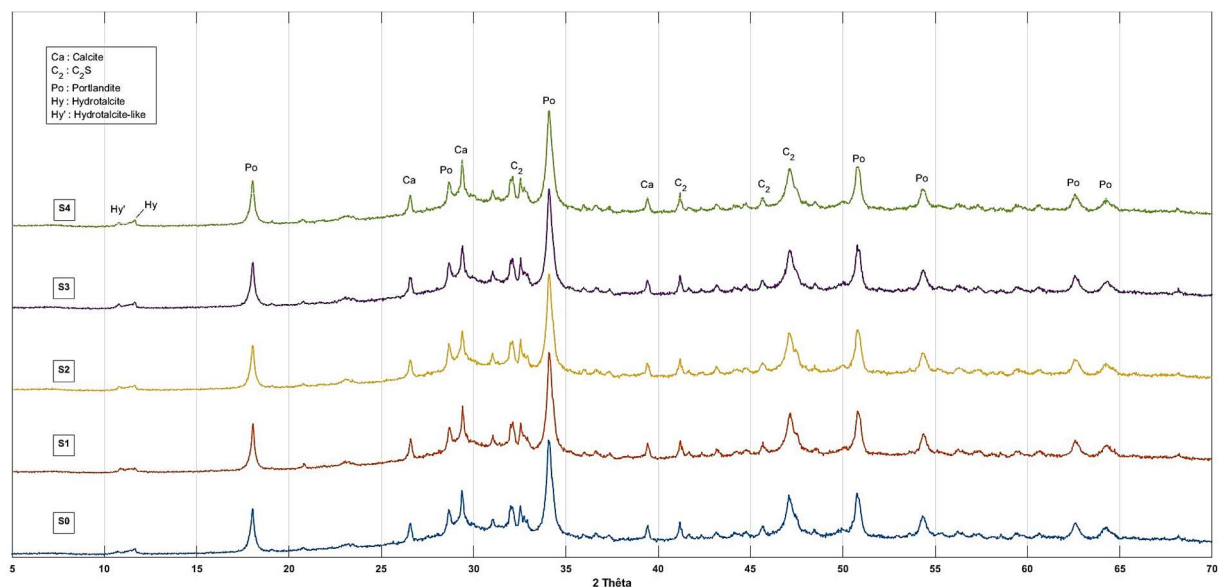


Figure 54 - Diffractogramme de rayons X pour les mélanges LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte aux différentes concentrations à l'âge de 7 jours.

## b Thermogravimétrie

La Figure 55 montre les résultats des pâtes de CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte avec et sans adjuvants.

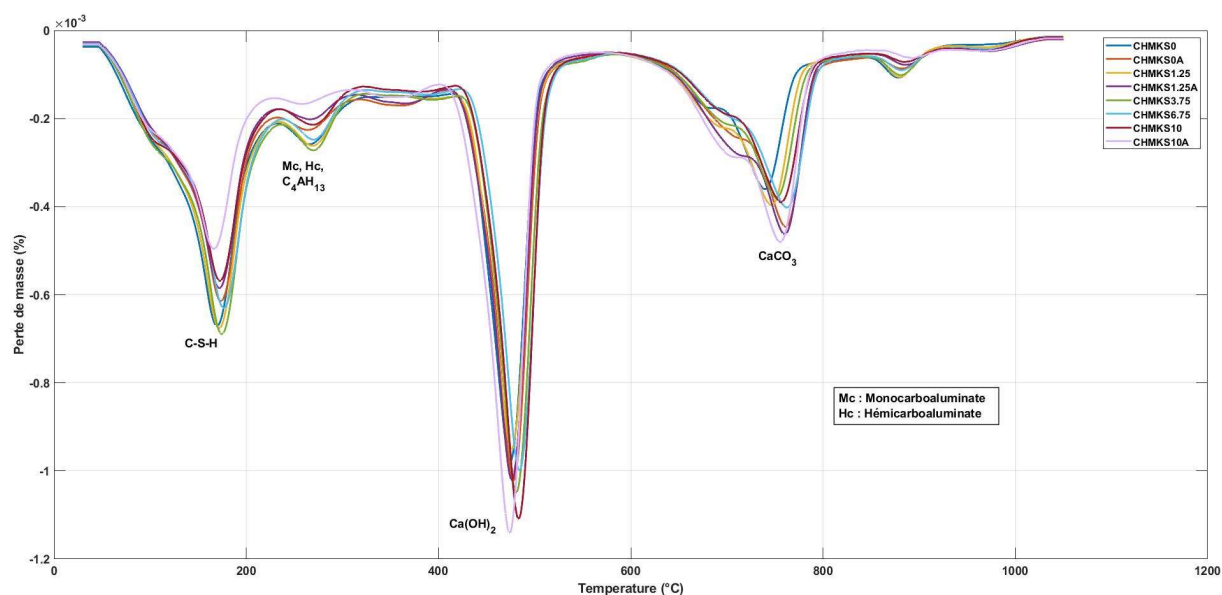


Figure 55 - Analyse thermogravimétrique des pâtes de CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte avec et sans adjuvant à l'âge de 7 jours.

Ce graphe met en évidence quelques différences entre les pâtes au niveau de l'intensité des pics. La pâte CHMKS10A (avec la solution la plus concentrée en chènevotte et l'adjuvant) présente le plus petit pic attribué au C-S-H par rapport aux autres mélanges et le pic le plus important de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Cela peut indiquer l'influence négative des extraits solubles de chènevotte en présence d'adjuvant sur la consommation de portlandite et la formation de C-S-H aux jeunes âges. La réaction pouzzolanique serait donc affectée à cette échéance.

Globalement, les pics de C-S-H et de Mc, Hc et  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  sont plus importants avec les solutions S0, S1.25 et S3.75 en absence de l'adjuvant. Pour ces concentrations et en présence de l'adjuvant, les pics de C-S-H sont réduits de façon croissante avec la concentration en extraits solubles, jusqu'au pic de la solution S10A (le plus petit). On remarque aussi que la solution S0A présente des pics plus petits que ceux des solutions S1.25, S3.75 et S6.75, indiquant l'effet marquant de l'adjuvant à l'âge de 7 jours.

Les pics de  $\text{Ca(OH)}_2$  et de  $\text{CaCO}_3$  présentent le comportement inverse. Plus la concentration en extraits solubles augmente, plus les pics de ces produits sont grands. Pour des petites concentrations en extraits solubles (variant entre 1,25% et 3,75%) l'influence négative est moins prononcée, avec un comportement proche de la solution témoin (S0). A l'inverse, pour des concentrations plus importantes, 6,75% et 10%, l'influence est plus prononcée et augmentée en présence de l'adjuvant. L'effet négatif de l'adjuvant est donc plus visible pour des concentrations en extractibles aux alentours de 10%.

La Figure 56 montre les résultats des pâtes de LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte avec et sans adjuvant à l'âge de 7 jours.

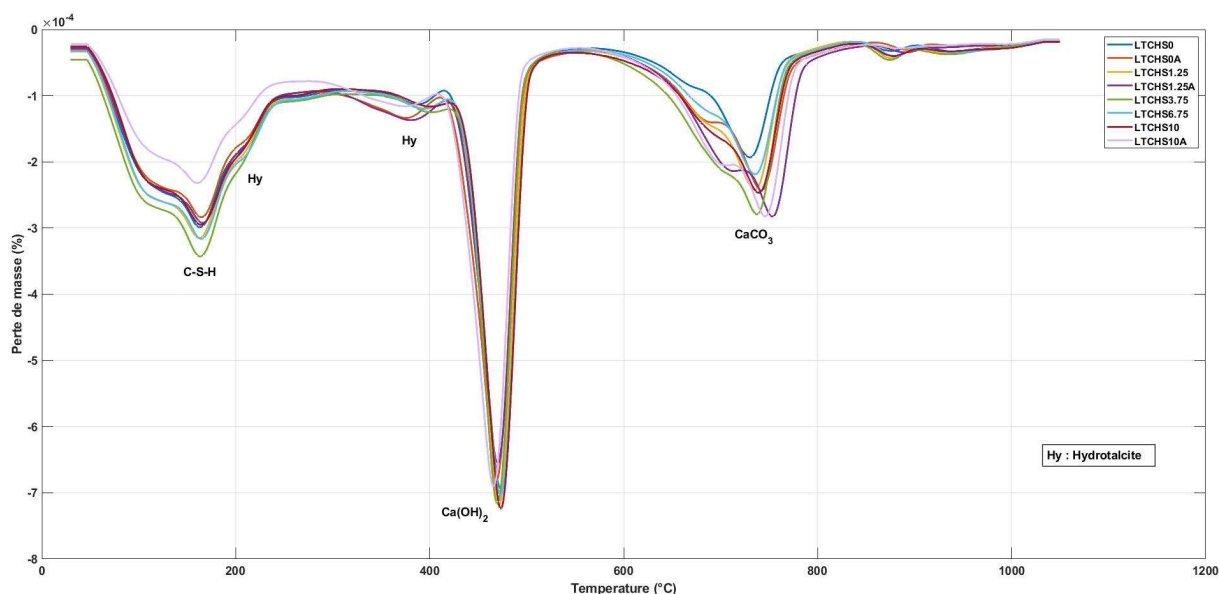


Figure 56 - Analyse thermogravimétrique des pâtes de LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte avec et sans adjuvant à l'âge de 7 jours.

Encore une fois la pâte LTCHS10A (avec la solution la plus concentrée en chènevotte et l'adjuvant) présente le plus petit pic correspondant aux C-S-H. Cependant, les pics de Portlandite sont équivalents ce qui peut être expliqué par le mécanisme de réaction du laitier alcali-activé. Alors que le liant CHMK consomme la Portlandite (activateur pouzzolanique) qui va réagir avec les silicates du MK pour former des C-S-H, le liant LTCH a surtout besoin de la chaux pour s'activer initialement mais n'en a plus forcément besoin pour former ensuite les C-S-H.

### c Calorimétrie isotherme

La Figure 57 présente les résultats pour la calorimétrie isotherme des mélanges en CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte et sans adjuvant. Les résultats en présence de l'adjuvant sont présentés séparément sur la Figure 58.

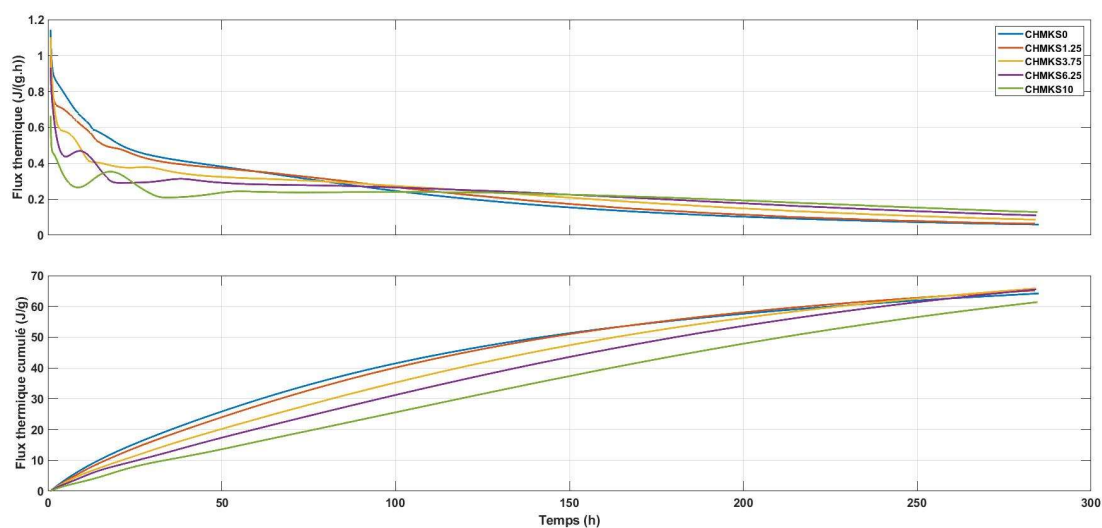


Figure 57 - Courbes de calorimétrie isotherme pour le mélange CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte (en haut le flux thermique et en bas le flux thermique cumulé).

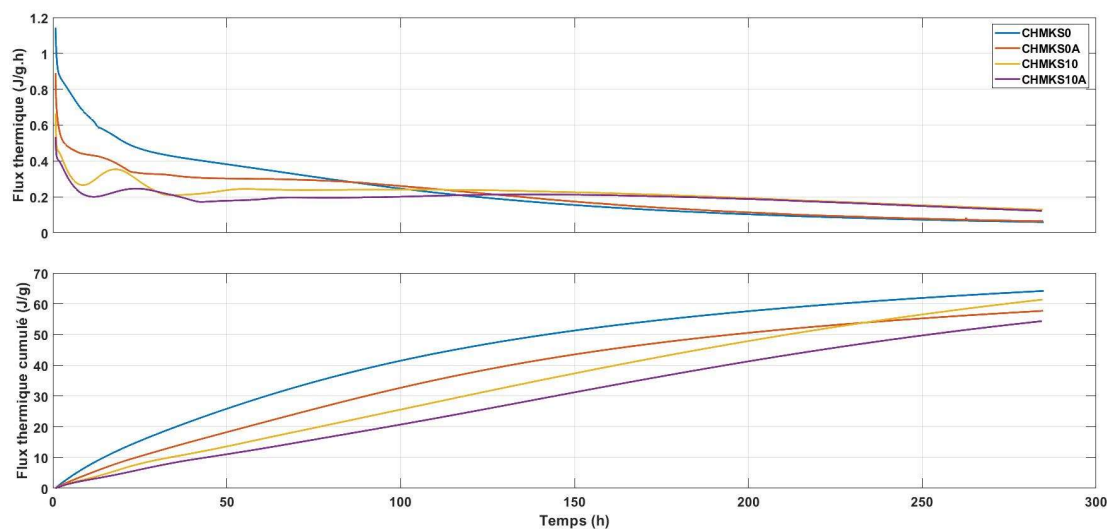


Figure 58 - Courbes de calorimétrie isotherme pour le mélange CHMK en présence des extraits solubles de chènevotte et/ou de l'adjuvant à même maniabilité (E/L variable). En haut le flux thermique et en bas le flux thermique cumulé.

Ces courbes mettent en évidence une très faible réactivité thermique des pâtes CHMK étudiées avec des quantités cumulées de chaleur à 250 h aux alentours de 60 J/g. On peut voir aussi une différence dans la cinétique d'acquisition de cette chaleur que l'on peut relier à des phénomènes de retard d'hydratation liés à la présence d'extraits solubles de la chènevotte.

Sur la Figure 57 l'effet négatif des extraits solubles est bien mis en évidence. On note ainsi des pics « résiduels » de libération de chaleur pour les solutions le plus concentrées (S6.25 et S10). Cela peut indiquer une interaction initiale plus forte en fonction de la concentration en extraits solubles qui s'affaiblit au fur et à mesure de la réaction d'hydratation comme le montre aussi l'analyse du flux thermique cumulé qui indique que la chaleur totale d'hydratation est pratiquement la même à plus long terme pour toutes les pâtes analysées.

Sur la Figure 58 on observe que l'adjuvant entraîne aussi une réduction du flux de chaleur. L'analyse du flux cumulé montre que la solution S0 libère une quantité de chaleur aux alentours de 65 J/g, tandis que la solution S0A libère environ 60 J/g et la solution S10A 55J/g. L'effet combiné des extraits solubles et de l'adjuvant est difficile à décrire de manière exacte mais, de façon générale, et pour les faibles concentrations en extraits, l'impact de l'adjuvant semble moins prononcé.

La Figure 59 présente les résultats pour la calorimétrie isotherme des mélanges en LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte et sans adjuvant. Les résultats en présence de l'adjuvant sont présentés Figure 60.

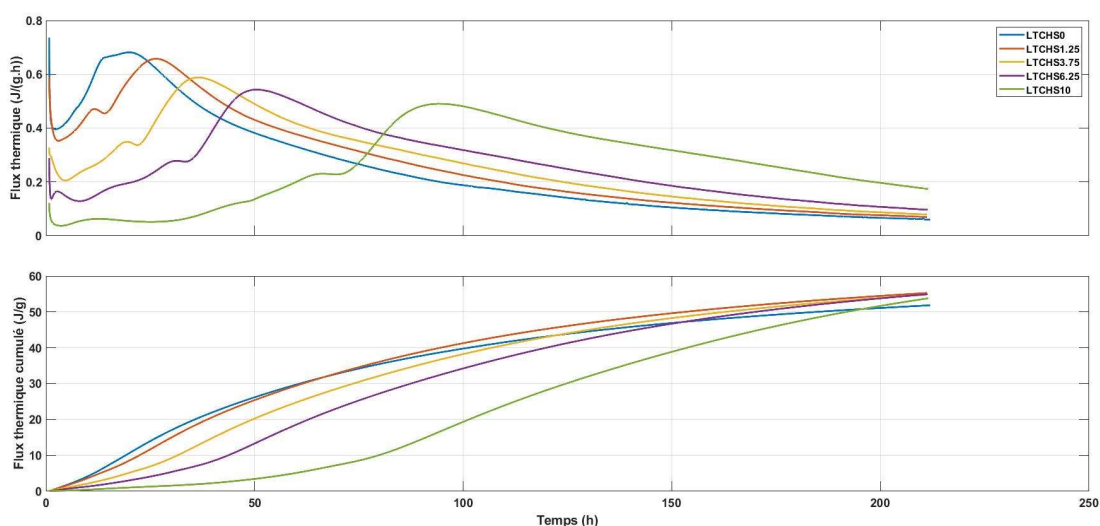


Figure 59 - Courbes de calorimétrie isotherme pour le mélange LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte (en haut le flux thermique et en bas le flux thermique cumulé).

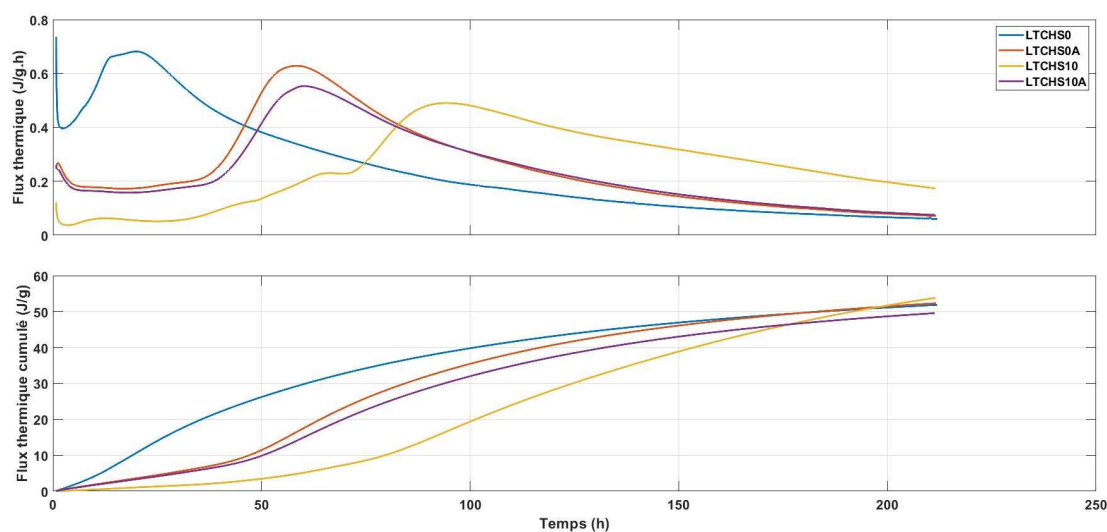


Figure 60 - Courbes de calorimétrie isotherme pour le mélange LTCH en présence des extraits solubles de chènevotte et/ou de l'adjuvant à même maniabilité (E/L variable). En haut le flux thermique et en bas le flux thermique cumulé.

Ces courbes mettent en évidence une très faible réactivité thermique des pâtes LTCH étudiées avec des quantités cumulées de chaleur entre 50 et 60 J/g.

En absence d'adjuvant (Figure 59), on peut voir très clairement une différence dans la cinétique de libération de cette chaleur que l'on peut relier à des phénomènes de retard d'hydratation liés à la présence des extraits solubles de la chènevotte. Ainsi, le pic du flux thermique de la solution la plus concentrée est décalé vers la droite (partie haute de la figure). Cependant, le flux thermique cumulé (partie basse de la figure) montre que ce retard n'est normalement pas nocif à terme à l'hydratation, vu que le flux cumulé à 200 h est le même pour toutes les pâtes étudiées.

Pour les pâtes en LTCH, la présence de l'adjuvant (Figure 60) semble retarder la prise du mélange témoin (S0) et réduire le retard entraîné par les extraits solubles pour le mélange le plus concentré (S10A). L'analyse des courbes de chaleur cumulée permet de dire que la présence de l'adjuvant, soit pour la solution S0A, soit pour la solution S10A, entraîne une cinétique propre de libération de chaleur (courbes rassemblées). Cela peut indiquer que, pour les mélanges en LTCH, contrairement aux mélanges en CHMK, l'adjuvant est bénéfique en présence des extraits solubles.

### 2.3.3 Observation au microscope électronique à balayage

Dans cette partie nous présentons quelques résultats des observations au microscope électronique à balayage (MEB). L'objectif est d'analyser le liant hydraté et la zone interfaciale entre la chènevotte et les matrices liantes hydratées.

L'équipement utilisé est un appareil de type JEOL JSM-6380 LV couplé à un spectromètre de dispersion d'énergie (EDS) RÖNTEC.

#### 2.3.3.1 Mortiers de sable

Nous avons effectué des analyses sur surface polie pour les mortiers composés des deux types de liants adjuvants.

Les analyses EDS ont été effectués sur des zones des échantillons composées par le liant comme montré sur la Figure 61.

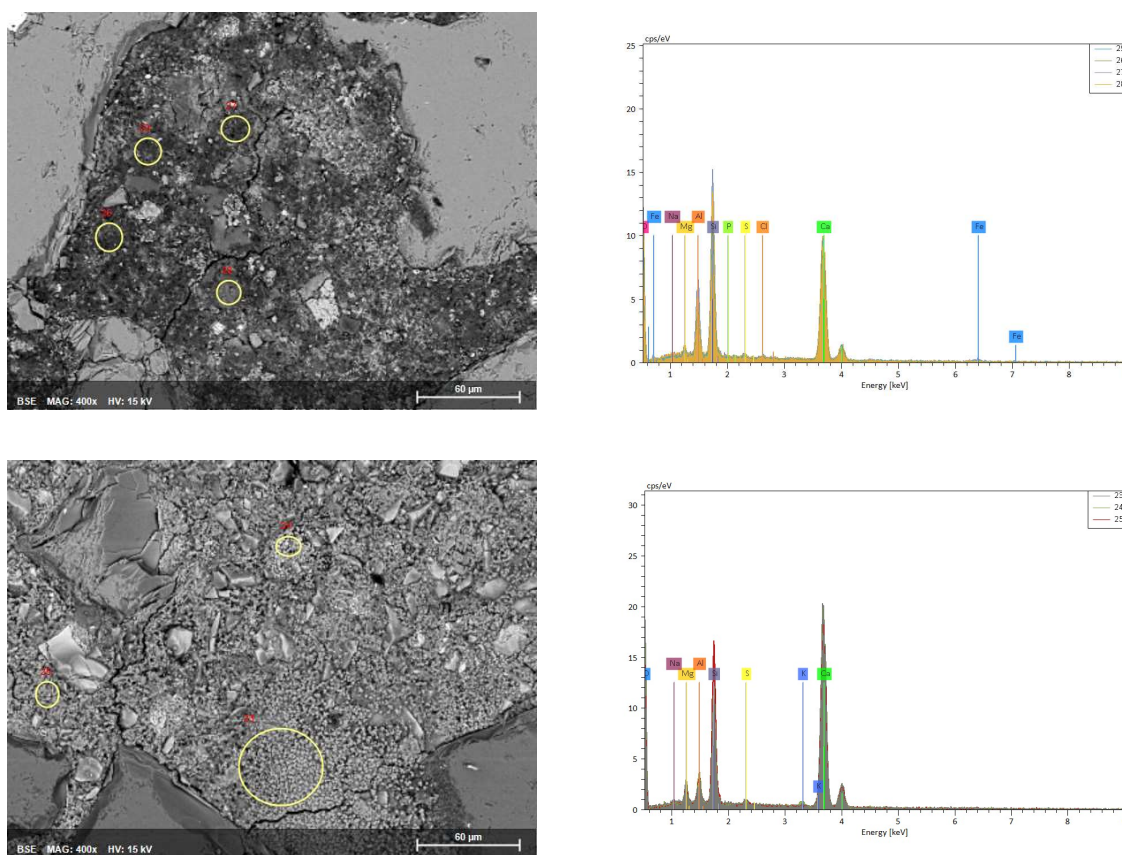


Figure 61 - Clichés MEB sur surface polie des mortiers (gauche) en CHMK (haut) et LTCH (bas) avec analyse EDS (droite).

Les images des mortiers (à gauche) mettent en évidence une pâte de meilleure qualité (apparence moins poreuse) avec LTCH (en bas) qu'avec CHMK (en haut). Ceci est à relier aux résistances mécaniques plus élevées avec LTCH.

Les analyses EDS (à droite) mettent en évidence la différence de composition entre les deux liants hydratés. Le liant LTCH se caractérise par des pics plus importants en magnésium, potassium et sodium, que l'on retrouve dans le laitier alors que le liant CHMK se caractérise par des pics plus importants en silicium associé au quartz venant du métakaolin.

### 2.3.3.2 Béton de chanvre

Pour les bétons de chanvre, et compte tenu de leurs faibles performances mécaniques, nous présentons uniquement des analyses sur fracture. La Figure 62 présente quelques clichés significatifs pour le béton de CHMK et la Figure 63 ceux pour les bétons de LTCH.

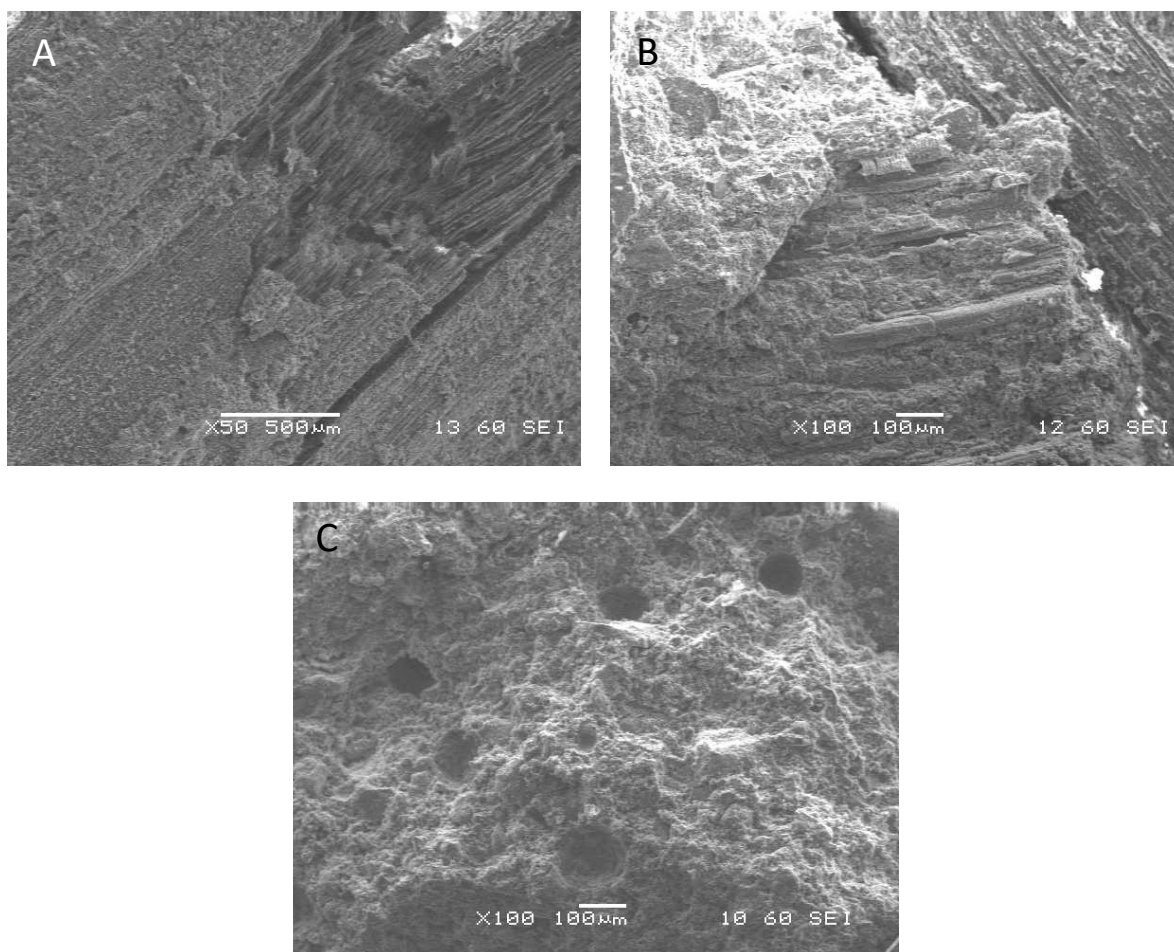


Figure 62 - Clichés MEB sur fracture du béton de chanvre de CHMK (A : x 50 ; B : x 100 ; C : x 100).

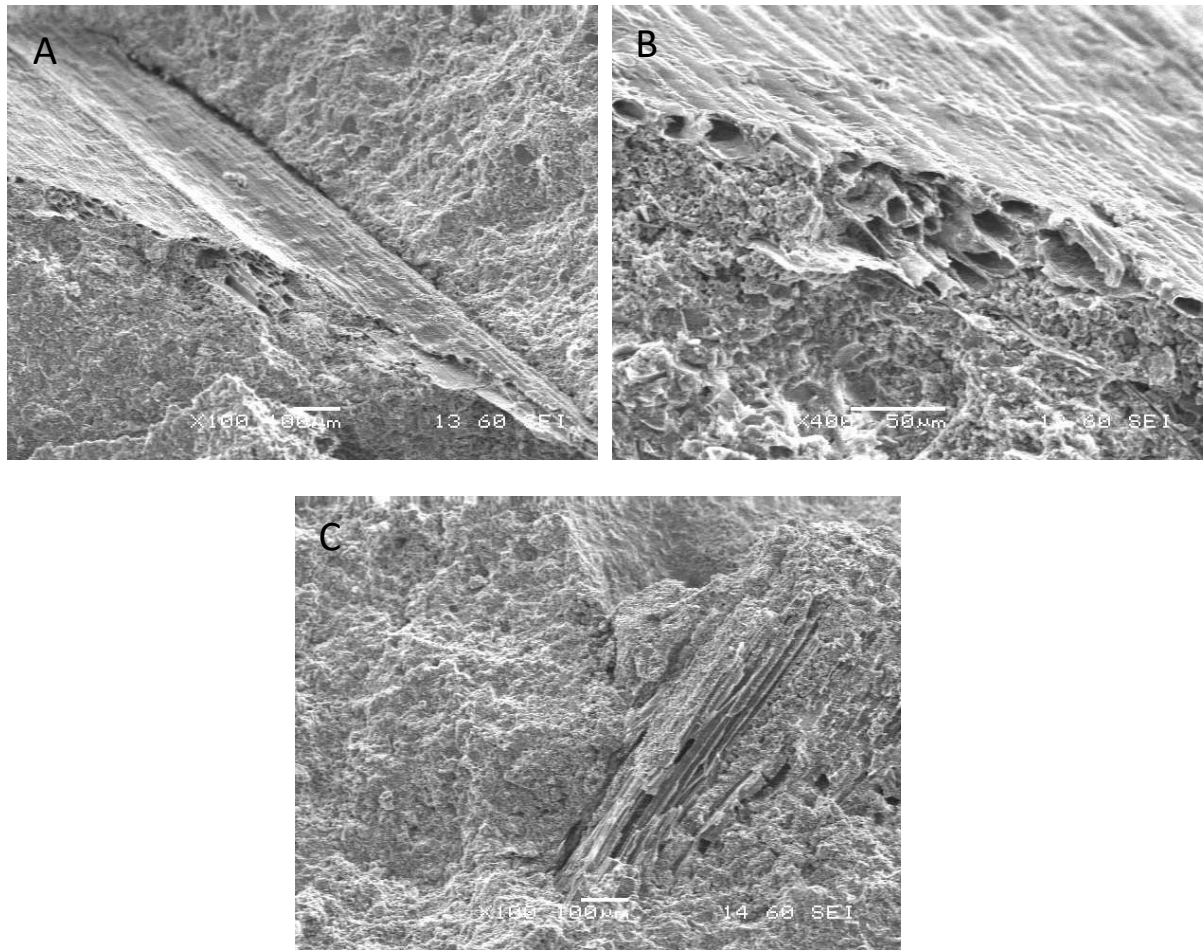


Figure 63 - Clichés MEB sur fracture du béton de chanvre de LTCH (A : x 100 ; B : x 400 ; C : x 100).

Sur les clichés présentés, et quel que soit le liant, on observe que les granulats de chènevotte sont bien intégrés à la matrice liante. Les photographies mettent aussi bien en évidence la porosité multimodale des bétons de chanvre comme discuté précédemment mais aussi des bulles d'air occlus à l'intérieur du liant hydraté (Figure 62 c).

## 2.4 Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude sur la formulation de deux liants bas carbone, un classique et l'autre plus innovant. La discussion a traité du choix des constituants utilisés pour les mélanges jusqu'à la réalisation de plaques préfabriquées des bétons de chanvre pour rénovation par l'intérieur de façades de bâtiments anciens.

En ce qui concerne le choix des liants, il apparaît que les liants LTCH sont plus performants mécaniquement que les liants CHMK. De plus, il est plus facile de réduire l'eau dans les liants LTCH et de trouver un superplastifiant performant. La carbonatation a aussi été mise en avant

non seulement pour son pouvoir de puits de carbone, mais aussi pour sa capacité à améliorer la résistance mécanique des mélanges au cours du temps.

Les différents types de mise en œuvre (coulage) effectués ont permis d'évaluer l'influence des techniques de banchage et de vibrocompactage sur le comportement mécanique des bétons de chanvre. Les bétons banchés présentent des résistances mécaniques plus élevées que celles des bétons de chanvre vibrocompactés mais aussi des masses volumiques plus importantes. Compte tenu du type d'application visée, une mise en œuvre par vibrocompactage a été choisie car elle propose le meilleur équilibre entre le comportement mécanique souhaité et les propriétés d'isolant et de régulation hydrique nécessaires à la rénovation du bâti ancien.

La caractérisation physique des différents bétons de chanvre a mis en avant le fort potentiel de régulation de l'humidité relative ambiante de ces matériaux. Cette caractéristique permet d'équilibrer leur conductivité thermique plus élevée que celles des isolants conventionnels. A partir des données de caractérisation en laboratoire, les mélanges en LTCH s'avèrent un peu moins favorables à la rénovation, tout en restant performants, à cause de leur perméabilité à la vapeur et leur MBV inférieures à celles du mélange en CHMK et une conductivité thermique plus importante. Une caractérisation *in-situ* dans des conditions réelles, comme présenté au chapitre suivant, devrait permettre une analyse plus approfondie.

Finalement, une analyse microstructurale a permis d'évaluer l'influence de la présence des extraits solubles et de l'adjuvant sur les réactions d'hydratation des liants. Globalement, ces deux composants retardent la prise des deux liants étudiés mais sans préjudice pour la formation des hydrates à long terme.

## CHAPITRE 3 INSTRUMENTATION *IN-SITU*

Le comportement hygrothermique des matériaux de construction, et en particulier les bétons biosourcés, est relativement bien connu et étudié dans les conditions de laboratoire. Des essais, comme le NORDTEST (Rode *et al.*, 2005) permettent de quantifier le tampon hygroscopique en conditions contrôlées, et sur un échantillon de taille modeste, ne préjugant pas nécessairement du comportement à l'échelle d'une paroi, pour une quantité de matériau plus conséquente. Il sert néanmoins à classer et à comparer les matériaux entre eux.

Si l'on mène une recherche bibliographique sur le sujet, on constate qu'il existe peu de travaux sur la performance hygrothermique dans des conditions climatiques réelles à l'échelle d'un logement ou d'un bâtiment (Moujalled *et al.*, 2018 ; Asli *et al.*, 2021), et encore moins dans le cas d'un bâti ancien. Les dernières recherches sur la réponse hygrothermique transitoire du béton de chanvre ont été essentiellement menées à l'échelle du mur mais en conditions de laboratoire (Labat *et al.*, 2016 ; Seng, 2018 ; Boumediene *et al.*, 2022).

Il nous semble donc très intéressant de pouvoir étudier le comportement de ce type de matériau à une échelle différente pour montrer si celui-ci reproduit les effets observés à l'échelle de l'échantillon de laboratoire. Afin d'étudier le comportement hygrothermique du bâti ancien du centre de Cahors, nous avons choisi d'installer une instrumentation *in-situ* au sein de deux bâtiments représentatifs de la typologie constructive locale. Le matériel de mesure (description, étalonnage, positionnement) ainsi que les résultats obtenus à l'échelle de la paroi sont présentés dans ce chapitre.

### 3.1 Présentation du cas d'étude

Les centres anciens dans la plupart des petites villes en France, et de façon plus précise à Cahors, présentent parfois pour certains de leurs bâtiments un niveau de dégradation et un taux de vacance élevés. Ces facteurs combinés à la précarité énergétique de leurs occupants ont engendré le dépeuplement de ces centres anciens.

En mettant en avant le besoin urgent de rénovation énergétique de son centre ancien, la ville de Cahors a engagé une stratégie de reconquête de sa centralité avec la révision du Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur du secteur sauvegardé. Le plan d'actions a été structuré

essentiellement sur l'expérimentation et l'innovation. Le Grand Cahors a donc initié la démarche ENERPAT (Energie/Patrimoine) qui vise à développer sur le territoire un pôle de compétences à rayonnement régional sur la thématique de la réhabilitation énergétique du bâti ancien.

Afin de conforter cette démarche, le Grand Cahors a répondu à un appel à projet européen pour la mise en place d'une expérimentation au sein de trois villes européennes : Vitoria-Gasteiz en Espagne, Porto au Portugal et Cahors en France. Dans ce cadre européen, le projet homonyme (ENERPAT SUDOE)<sup>2</sup> et pionnier de sa catégorie (Economie faible en carbone) a bénéficié d'un soutien de 1,4 million d'euros sur 3 ans (entre 2016 et 2018). Ce financement a donné la possibilité de mise en place d'un « laboratoire vivant » (Living Lab) pendant la thèse de (Claude, 2018).

Dans ce contexte, deux bâtiments datés du 13<sup>ème</sup> siècle, représentatifs des typologies typiques des centres anciens du sud-ouest français ont été choisis parmi les appartements qui appartenaient à la mairie de Cahors. Ils se situent dans un secteur qualifié de « patrimonial remarquable », plus précisément dans l'Ilot Chico Mendes, comme montré sur la Figure 64.

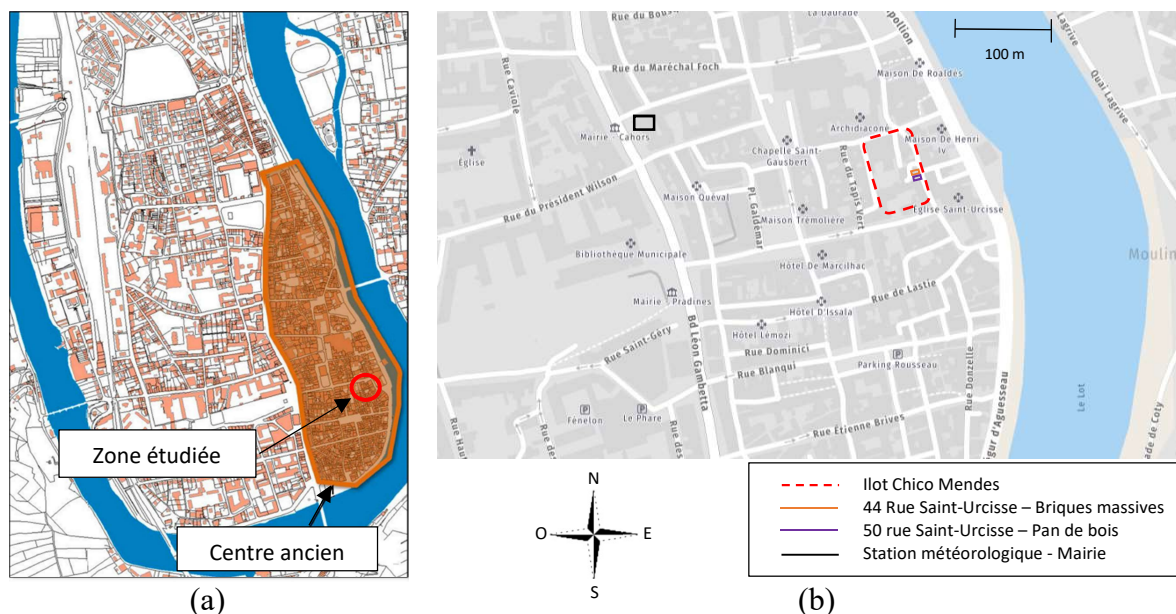


Figure 64 - (a) Délimitation du centre ancien de Cahors et de la zone étudiée (b) Intégration urbaine de l'îlot Chico Mendes et des deux bâtiments étudiés situés rue Saint-Urcisse.

<sup>2</sup> <https://enerpatsudoe.fr/projet-enerpat/>

Cet îlot, alors à l'abandon, a été racheté par la mairie de Cahors et fait aujourd'hui l'objet d'une Commission Publique d'Aménagement afin d'être rénové puis revendu. L'objectif est de créer principalement des logements familiaux en accession à la propriété, rénovés avec des solutions de type biosourcé, d'où l'importance de valider les solutions techniques d'écornovation choisies.

Les deux bâtiments étudiés sont situés dans la rue Saint-Urcisse et présentent deux typologies constructives différentes au niveau de leur enveloppe extérieure (cf. Figure 64) :

- Au numéro 44, des parois extérieures en brique massive avec des épaisseurs de mur l'ordre de 40 cm sur toute la hauteur du bâtiment,
- Au numéro 50, des parois extérieures en pan de bois dans les étages, jamais présentes en rez-de-chaussée. Dans ce bâtiment nous avons donc un mur épais de près d'un mètre au rez-de-chaussée surplombé par les étages de pan de bois, avec un remplissage de brique de 14 cm.

Suite à des ateliers de cocréation menés dans le cadre du Living Lab mis en place, une solution technique de rénovation en chaux-chanvre banché (aussi appelée « béton de chanvre ») a été utilisée pour isoler les façades ouest du R+1 des deux bâtiments en septembre 2016 avec 15 cm d'épaisseur. Cette solution de rénovation a été validée par des simulations numériques (portant notamment sur la protection contre le risque de moisissures) dans le cadre de la thèse de (Claude, 2018). Cependant, la teneur en eau élevée présente à l'intérieur du revêtement isolant lors du coulage, et qui a perduré durant les derniers mois de l'étude, a empêché l'analyse des données d'humidité. Cette forte teneur en eau est attribuée non seulement à la mise en œuvre de l'isolant (appliqué en banchage), mais aussi au type de liant choisi comme discuté précédemment.

Afin de tester les bétons de chanvre préfabriqués développés dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi d'instrumenter seulement le R+2 du bâtiment en pan de bois (50 rue Saint-Urcisse), ce choix se justifiant par le très mauvais état et les contraintes techniques (difficulté d'accès à l'électricité, par exemple) du bâtiment en briques massives. Enfin, cet étage avait été précédemment rénové avec une solution technique classique, en polystyrène de 5 cm d'épaisseur et plâtre de 1 cm d'épaisseur, ce qui permettait une comparaison entre ce type de rénovation et l'écornovation à l'aide de béton de chanvre préfabriqué que nous avons développé.

La Figure 65 présente les façades ouest des bâtiments étudiés. L'accent est mis sur les appartements retenus pour les analyses *in-situ*. Les centrales d'acquisition utilisées sont aussi représentées. Sur la Figure 66, les façades côté est (sur la rue Saint-Urcisse) sont présentées.

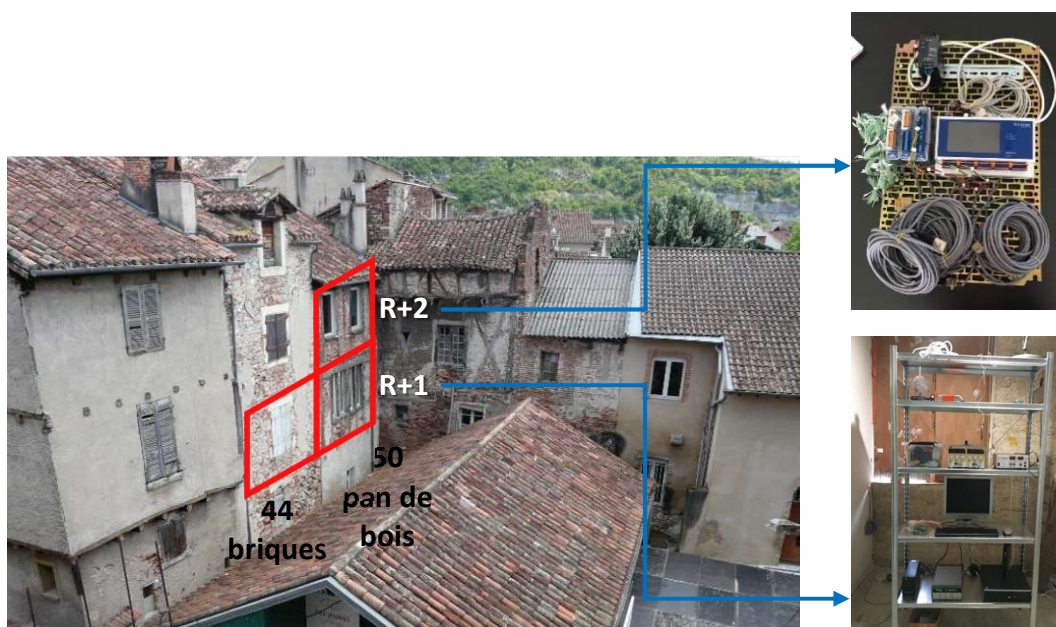


Figure 65 - Façade ouest des bâtiments étudiés et centrales d'acquisition utilisées par étage.



Figure 66 - Façade est des bâtiments depuis la rue Saint-Urcisse numéro 50 à gauche et numéro 44 à droite.

Au R+1 une centrale d'acquisition multiplexée de la marque Agilent® a été mise en place en 2016 par (Claude, 2018). Cinq ans après, nous avons récupéré le système d'acquisition, réétalonné les capteurs et remis en place l'ensemble des équipements (mars 2021). Une brève section dans la suite du manuscrit sera dédiée à la discussion de la procédure d'étalonnage des sondes utilisées, à savoir des thermocouples, thermohygromètres et fluxmètres.

Sur la Figure 67, le plan du R+1 comprenant les bâtiments numéro 50 (pièces 1 et 2), avec ossature en pan de bois, et numéro 44 (pièce 3), avec ossature en briques massives est présenté. Sur la Figure 68, on présente le système d'acquisition existant actuellement au R+1.

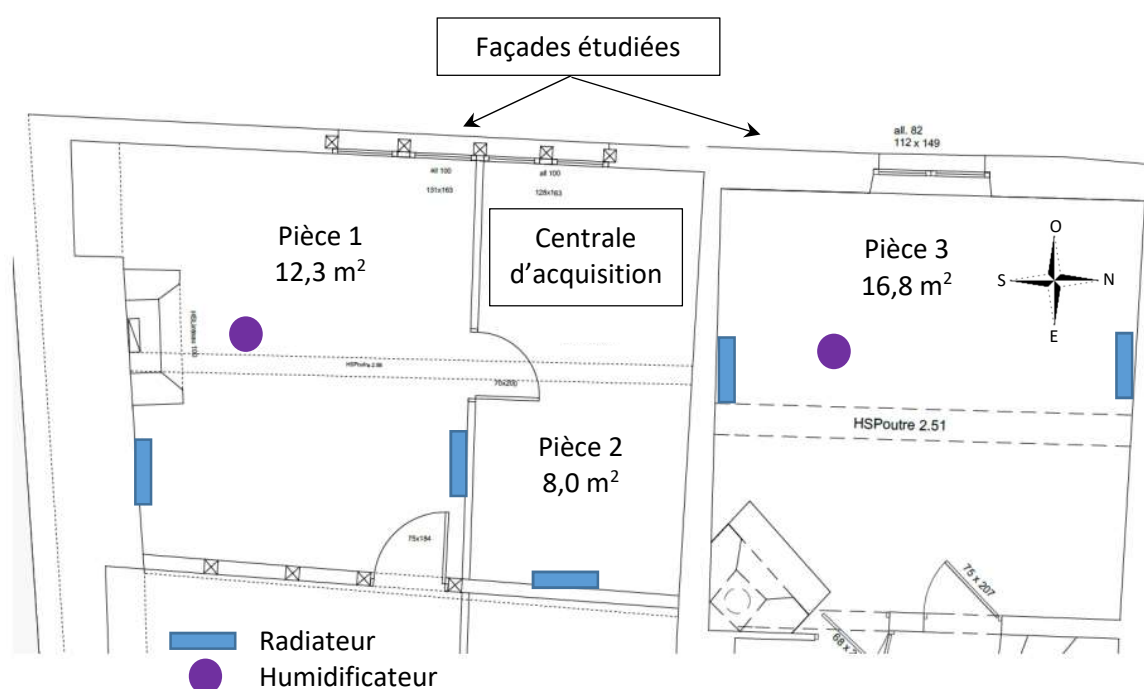


Figure 67 - R+1 : Numéro 50 (pièces 1 et 2) en pan de bois et numéro 44 (pièce 3) en briques massives de la rue Saint-Urcisse.

Le fait que ces appartements appartiennent au patrimoine de la mairie de Cahors et qu'ils soient vacants nous a permis d'étudier l'évolution des différents paramètres hygrothermiques en évolution libre ainsi que de simuler une occupation en appliquant une température de consigne et des dégagements d'humidité grâce à des humidificateurs. Pour les radiateurs électriques, une puissance moyenne de  $160 \text{ W/m}^2$  a été mise en place. Pour la période d'humidification, le débit est de  $0,75 \text{ l d'eau/h}$ .

La centrale d'acquisition et les radiateurs sont connectés à un ordinateur ce qui permet une prise en main à distance grâce à une connexion internet, facilitant le suivi de l'instrumentation depuis

le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) à Toulouse (distant de 120 km).

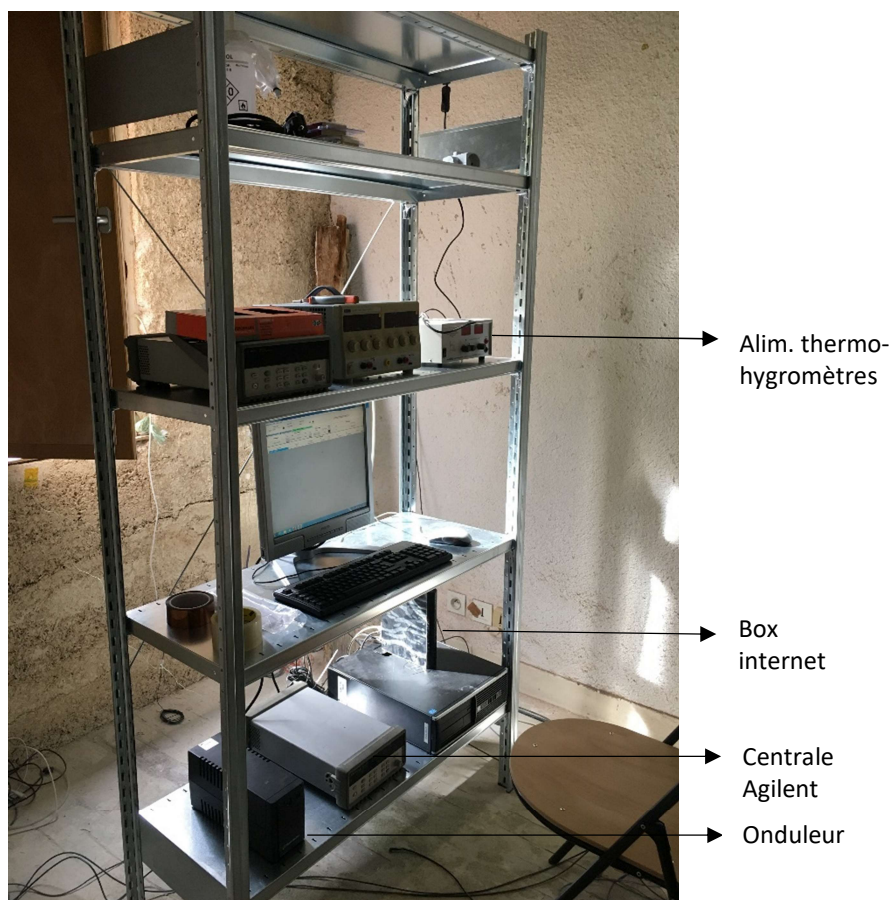


Figure 68 - Dispositif expérimental au R+1 (50 rue Saint-Urcisse - pièce 2).

Au R+2 une centrale de la marque Gantner<sup>®</sup> a été mise en place en mars 2021. La Figure 69 présente la configuration initiale de cet étage avec la portion de la paroi qui a été étudiée. Le choix de cette surface d'étude a été fait pour éviter les perturbations (ombre) des bâtiments environnants sur le rayonnement solaire direct (cf. Figure 65). Le plan de cet étage est présenté sur la Figure 70. D'une surface initiale d'environ 45 m<sup>2</sup>, la pièce a été scindée en deux par une paroi souple rajoutée, composée d'un matériau isolant et étanche. La surface créée de 22 m<sup>2</sup> a ainsi une surface proche des autres pièces étudiées. La hauteur sous plafond est similaire.

Comme dit précédemment, une comparaison entre une rénovation conventionnelle avec du polystyrène et du plâtre (configuration originale du bâtiment) dans un premier temps et une rénovation postérieure en béton de chanvre préfabriqué (qui nous avons développé) a été menée au R+2. Ces configurations et un aperçu des capteurs installés sont présentés sur la Figure 71.



Figure 69 - Configuration initiale du R+2 et surface de paroi étudiée (en pointillée rouge).

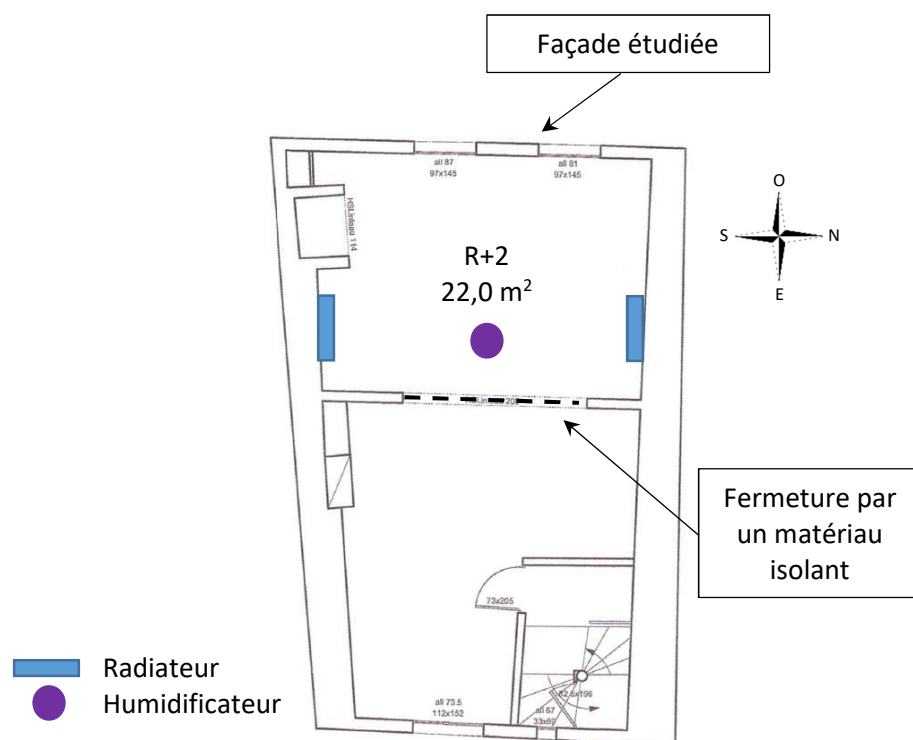


Figure 70 - R+2 : Numéro 50 de la rue Saint-Urcisse avec ossature en pan de bois.

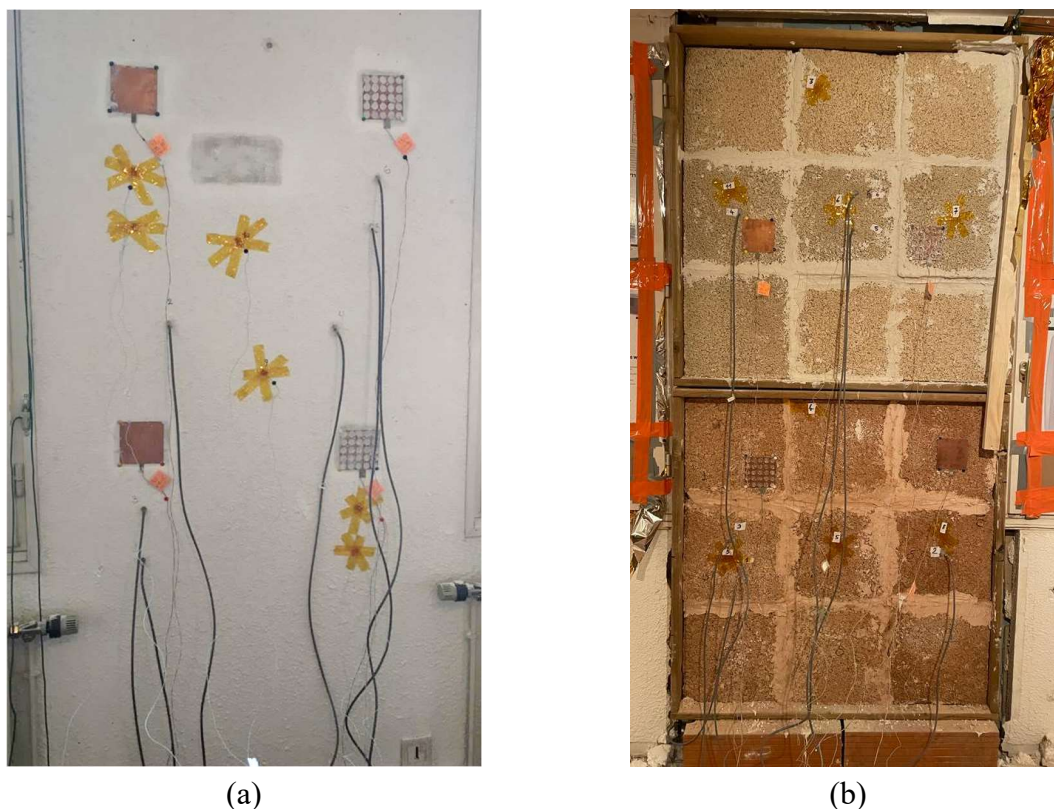


Figure 71 - Configurations étudiées (a) revêtement en polystyrène (état initial) et (b) revêtement en béton de chanvre préfabriqué (état rénové) : en haut le liant en LTCH et en bas le liant en CHMK.

Le suivi des températures et des humidités relatives à l'intérieur de chaque pièce a été possible grâce à des capteurs autonomes de type KIMO<sup>®</sup> : ces capteurs ont été placés au centre de chaque pièce, à 1,5 m du sol et présentent une autonomie d'environ 1,5 mois (mémoire interne) pour le pas de temps choisi. Pour les conditions aux limites extérieures, une centrale météorologique a été mise en place sur le toit du bâtiment de la mairie de Cahors située à environ 400 m des bâtiments étudiés (cf. Figure 64). Pour tous les capteurs utilisés, un pas de temps d'acquisition de 10 minutes a été retenu (compromis entre la taille du stockage et l'intérêt pour l'observation de la dynamique des phénomènes).

### 3.2 Description détaillée des parois et de leur instrumentation

Nous commençons par présenter la mise en place de la paroi en plaques préfabriquées au R+2. Comme on peut le voir sur la Figure 71(b), des cadres en bois de 1 m<sup>2</sup> ont été utilisés pour chaque mélange afin de compenser le fait que les plaques ne sont pas autoportantes. L'application des blocs sur le mur de base se fait avec un enduit colle de même composition que les mélanges utilisés pour couler les cubes vibrocompactés (mélange 2/3 CH + 1/3 MK

pour les plaques CHMK et mélange 2/3 LT + 1/3 CH pour les plaques LTCH). L'utilisation de 1% d'adjuvant permet d'utiliser une faible quantité d'eau pour arriver à la consistance désirée et ainsi de s'affranchir des problèmes liés aux taux d'humidités initiales élevés comme a été constaté par (Claude, 2018). L'enduit colle a été appliqué à la spatule crantée sur le mur et sur 5 faces des plaques (seule la face visible n'est pas enduite) de manière à assurer un collage efficace des plaques à la fois contre le mur et entre elles. Les plaques ont été pressées manuellement sur le mur et maintenues en place durant le durcissement de l'enduit par un système de cales.

Il est important de souligner que nous n'avons pas observé de pathologies spécifiques au moment où le revêtement en polystyrène a été enlevé.

En ce qui concerne les capteurs, trois types ont été utilisés au niveau de la paroi : thermocouples de type K, fluxmètres thermiques et thermohygromètres, comme présenté dans les deux parties suivantes.

### 3.2.1 Mesures de température et d'humidité

Des thermocouples ont été placés en surface du revêtement isolant du côté intérieur et en surface de la paroi du côté extérieur ; dans ce cas, un boîtier en plastique de couleur claire a été utilisé pour s'affranchir des effets du rayonnement solaire, étant donné que la façade étudiée est orientée côté ouest avec un facteur de vue du ciel (ratio entre les radiations reçues par une surface plane et celle des radiations en provenance de la voûte céleste) assez important. Ces capteurs ont été étalonnés préalablement en laboratoire à l'aide d'un bain thermostaté. La sonde de référence est une résistance de type Pt100. Les températures du cryostat ont été choisies sur une plage entre 0°C et 40°C par pas de 10°C. Pour chaque thermocouple, la température de la résistance de platine et les tensions de sortie (V) sont comparées. Les coefficients d'étalonnage sont obtenus par régression linéaire.

Les thermohygromètres, de la marque Honeywell type HIH4602-C, mesurent la température et l'humidité relative au cœur de l'isolant en béton de chanvre (à 5 cm de la surface) ainsi qu'à l'interface entre l'isolant et le mur porteur. Ces sondes sont constituées d'un capteur de température type Pt1000 et d'un capteur d'humidité relative à polymère capacitif. Le temps de réponse est de 50 secondes. Une attention particulière a été portée à la mise en place de ces sondes au sein du matériau, de manière à mesurer de la façon la plus fiable possible les

propriétés hygrothermiques (perçage de l'emplacement, vérification de la position, rebouchage étanche pour s'affranchir de l'influence de l'air intérieur, *etc.*).

Pour les mesures de températures, les résistances Pt1000 sont connues par leur précision d'usine. Néanmoins, *in-situ*, avec un branchement à 2 fils sur les centrales d'acquisition et des longueurs de câbles conséquentes, une calibration a dû être effectuée pour garantir une bonne précision. La procédure a été menée préalablement en laboratoire avec une enceinte climatique. Dans un premier temps, l'humidité relative est maintenue à  $50\% \pm 2$  et la température varie par pas de  $10^{\circ}\text{C} \pm 1$  entre 20 et  $50^{\circ}\text{C}$ . Ensuite, l'humidité relative est maintenue à  $80\% \pm 2$  et les mêmes plages de température sont appliquées. Pour chaque sonde, une régression linéaire est faite pour déterminer le gain et l'offset qui seront appliqués directement au niveau de la centrale d'acquisition pour corriger les valeurs mesurées.

### 3.2.2 Mesures de flux thermiques

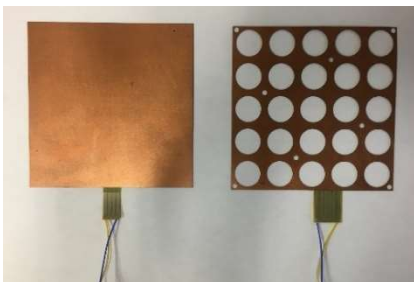
Les fluxmètres ont été installés du côté intérieur et sont fixés sur la surface du revêtement. Afin de s'affranchir des aspérités de la paroi, une pâte thermique a été utilisée en faible quantité pour maximiser le contact entre le mur et le fluxmètre et éviter au maximum les résistances de contact. Au R+1, les capteurs de la marque Ahlborn® de 12x12 cm, et au R+2 les capteurs de la marque Captec® de 10x10 cm, ont été utilisés. La procédure d'étalonnage de ces capteurs a été réalisée au laboratoire et est détaillée dans (Malagoni *et al.*, 2021) (cf. Annexe).

Le Tableau 25 relève la précision et les plages de mesures des capteurs installés et le Tableau 26 présente les différents capteurs avec leurs dimensions.

Tableau 25 - Description des capteurs utilisés sur le banc *in-situ*.

| Grandeur mesurée                                  | Type de capteur                                                      | Plage de mesure               | Précision                                                                             |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Température de surface                            | Thermocouple de type K (Alumel-Chromel)                              | -100 à 1370°C                 | ±0,3°C                                                                                |
| Température et humidité relative de l'air ambiant | Thermohygromètre (KIMO KH50 et KH110)                                | -20 à 70°C                    | De -20 à 0°C : ±0,6°C<br>De 0 à 30°C : ±0,5°C<br>De 30 à 70°C : 1,5% de la valeur lue |
|                                                   |                                                                      | 5 à 95%HR                     | De 15°C à 25°C : ±2%HR                                                                |
| Température et humidité relative dans la paroi    | Pt1000 + Thermohygromètre à polymère capacitif (Honeywell HIH4602-C) | -40 à 85°C                    | ±0,3°C                                                                                |
|                                                   |                                                                      | 0 à 100%                      | ±3,5%HR                                                                               |
| Densité de flux thermique                         | Fluxmètre thermique                                                  | <b>Sensibilité moyenne</b>    |                                                                                       |
|                                                   | Ahlborn                                                              | 7,7 E-5 V/(W/m <sup>2</sup> ) | ±5%                                                                                   |
|                                                   | Captec plein                                                         | 1,9 E-4 V/(W/m <sup>2</sup> ) | ±3%                                                                                   |
|                                                   | Captec troué                                                         | 2,1 E-5 V/(W/m <sup>2</sup> ) | ±3%                                                                                   |

Tableau 26 - Dimensions des capteurs utilisés sur le banc *in-situ*.

| Type de capteur                                                    | Photo                                                                               | Dimensions                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Thermocouple de type K (Alumel-Chromel)                            |    | -                                                                               |
| Thermohygromètre KIMO KH50                                         |    | Côtés - 61,3 x 40 mm<br>Epaisseur - 21,9 mm                                     |
| Thermohygromètre KIMO KH110                                        |   | Côtés - 98,7 x 67,8 mm<br>Epaisseur - 34,7 mm                                   |
| Pt1000 + Thermohygromètre à polymère capacitif Honeywell HIH4602-C |  | Diamètre - 6,25 mm<br>Epaisseur - 6,60 mm                                       |
| Fluxmètre thermique                                                |  | Côtés - 100 x 100 mm<br>Epaisseur - 0,6 mm<br>Diamètre des perforations - 16 mm |

### 3.2.3 Positionnement détaillé des capteurs

#### a Etage R+1

Une vue de face côté intérieur de la paroi en pan de bois (pièces 1 et 2) au R+1 (revêtement en béton de chanvre banché) est présentée sur la Figure 72. Elle permet de visualiser l'emplacement des capteurs.

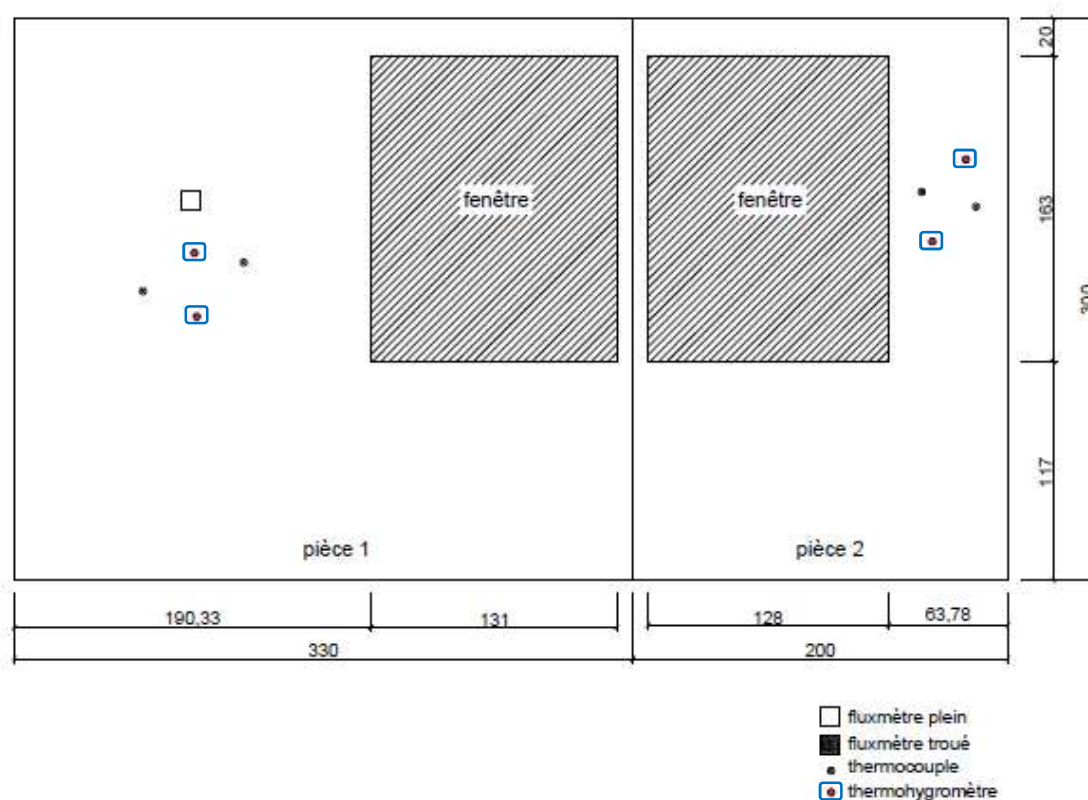


Figure 72 - Vue du côté intérieur de la paroi en pan de bois au R+1 (dimensions en cm).

Pour la paroi en briques massives, une vue identique de la pièce 3 est présentée sur la Figure 73.

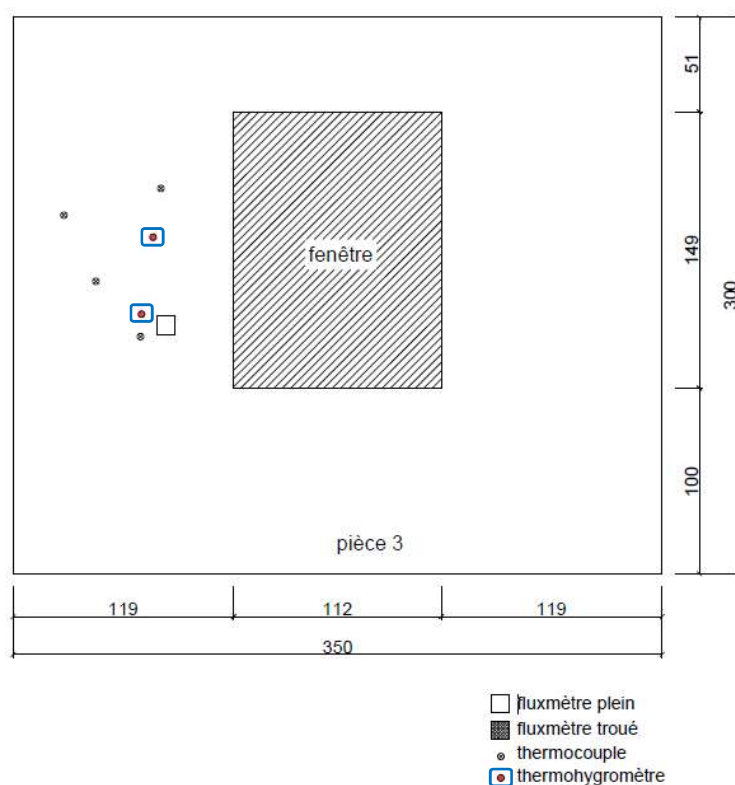


Figure 73 - Vue du côté intérieur de la paroi en briques massives au R+1 (dimensions en cm).

## **b Etage R+2**

Une vue du côté intérieur de la paroi en configuration initiale (polystyrène et plâtre) est présentée sur la Figure 74. Les lignes en traits discontinus représentent le bois visible du côté extérieur de la paroi. La région analysée correspond à la surface comprise entre les deux fenêtres et les dimensions sont données en centimètres.

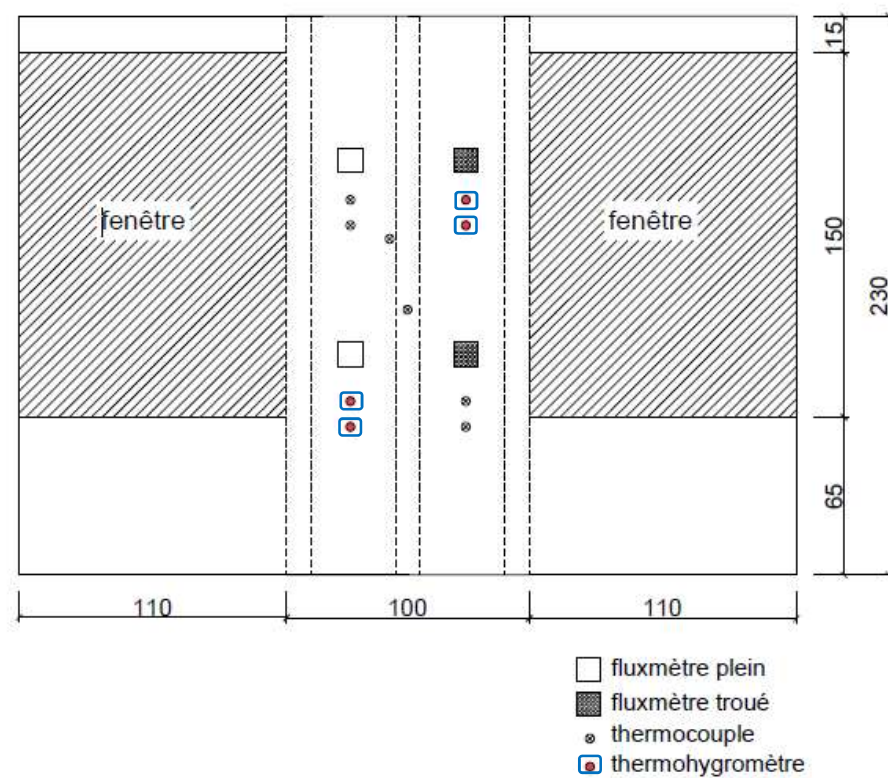


Figure 74 - Vue du côté intérieur de la paroi étudiée - configuration en polystyrène et plâtre.

La configuration après la mise en place du revêtement en béton de chanvre est présentée sur la Figure 75.

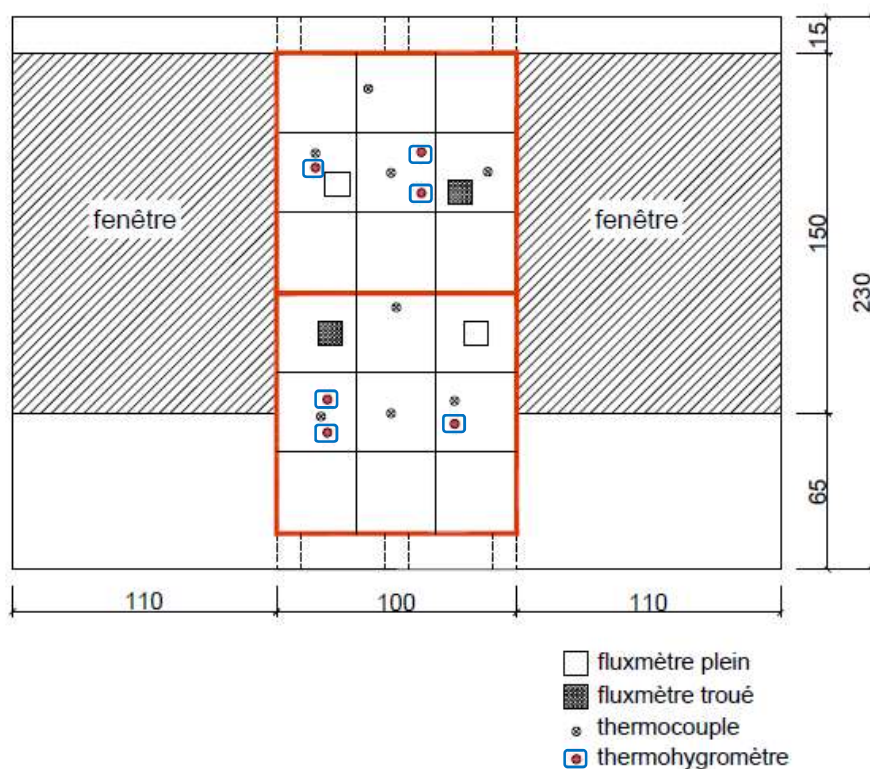


Figure 75 - Vue du côté intérieur de la paroi étudiée - configuration en béton de chanvre préfabriqué.

### 3.3 Monitoring à long terme des différentes parois

Dans cette partie, nous présentons les résultats du monitoring effectué pendant plus d'un an à Cahors entre mars 2021 et mai 2022. Au cours de cette période, plusieurs configurations ont été étudiées. Les paramètres analysés sont : la consigne du chauffage, le taux d'humidité intérieure, le positionnement des capteurs et la nature du revêtement isolant au R+2. La Figure 76 présente les configurations étudiées en termes de type de revêtement par étage et de positionnement des capteurs. La Figure 77 présente un aperçu général des périodes de chauffage et d'humidification.

La représentation graphique des données issues des sondes Honeywell suivra tout au long de ce chapitre la nomenclature des couleurs montrée sur la Figure 76, à savoir rouge pour les sondes à l'intérieur du revêtement en béton de chanvre (sondes a priori plus influencées par le chauffage) et bleu pour l'interface entre le revêtement et le mur porteur (sondes a priori plus affectées par les conditions aux limites extérieures).

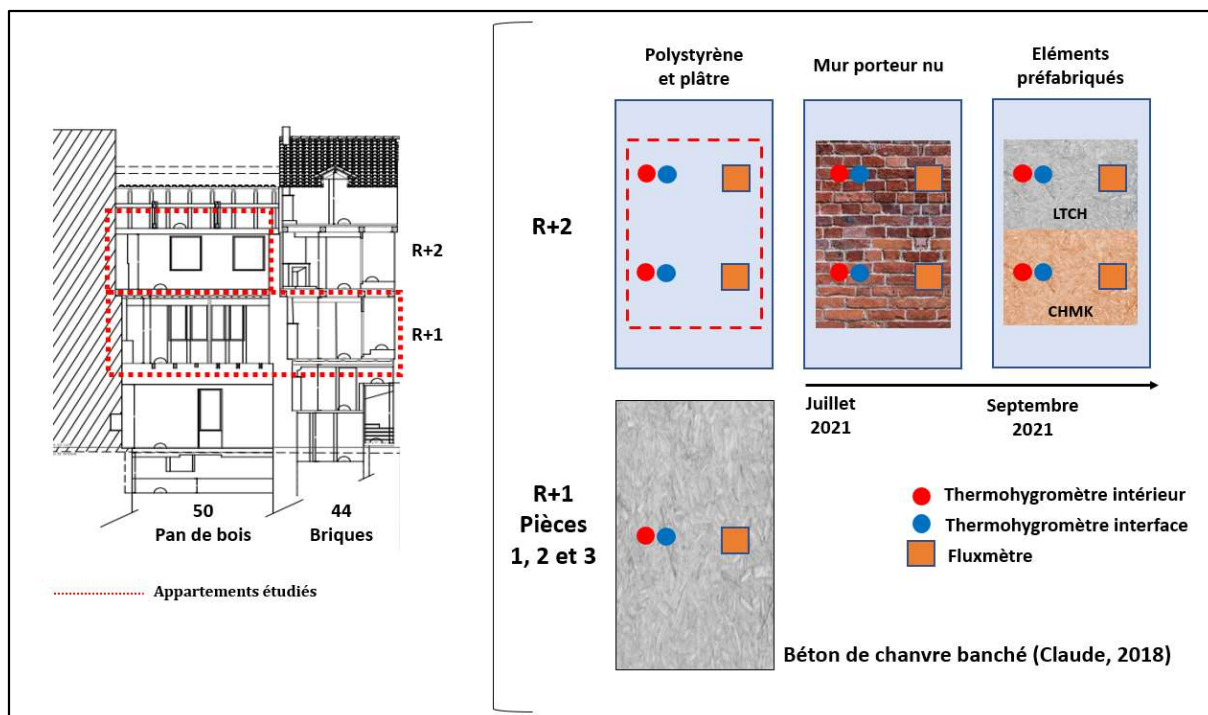


Figure 76 - Configurations étudiées au R+1 et au R+2.

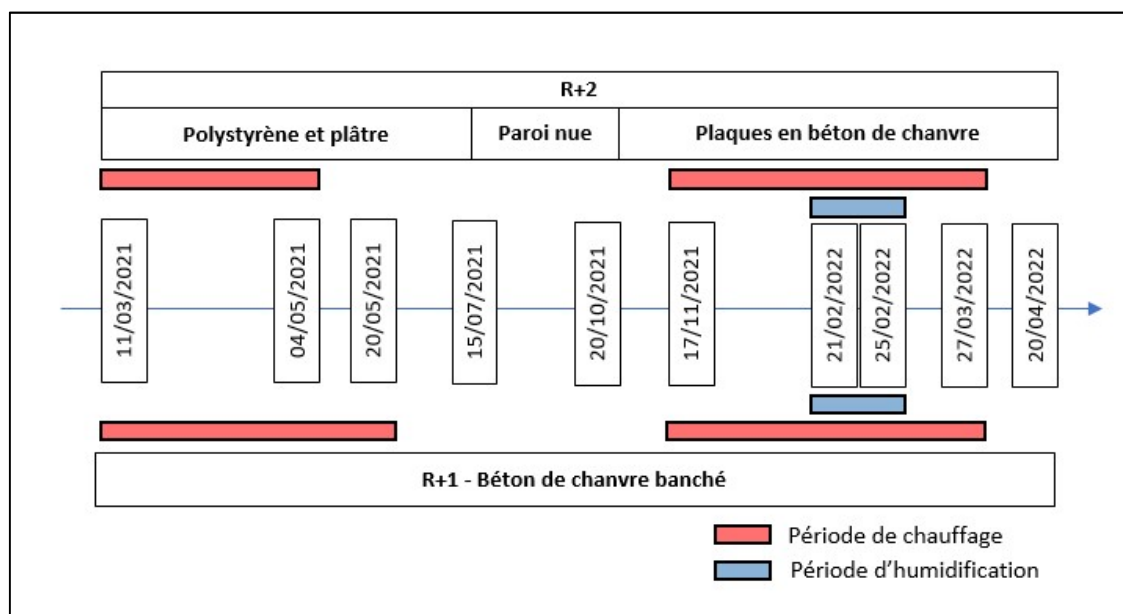


Figure 77 - Aperçu général des configurations de chauffage et d'humidification étudiées.

Les valeurs présentées correspondent à une moyenne horaire pour chaque capteur. Les signaux de température des sondes Honeywell (thermohygromètres) ont été traités à l'aide d'une transformée de Fourier, laquelle supprime les raies de haute fréquence avec un filtre gaussien.

En tenant compte du fait que les transformées de Fourier nécessitent des signaux dans le domaine temporel échantillonnés régulièrement pour fournir une sortie fiable et qu'au long des campagnes de mesure nous avons eu certaines périodes sans données (principalement dues à des coupures d'électricité et à des mises à jour du système d'acquisition), les résultats sont présentés par tranches temporelles selon les configurations étudiées.

A titre d'exemple, la Figure 78 présente le signal en température moyenné par heure pour le thermohygromètre de la pièce 1 au R+1 avant et après traitement avec le filtre gaussien pour une sonde et une période donnée. Le bruit peut être expliqué par plusieurs causes différentes, comme par exemple le branchement électrique - soit au niveau de la centrale d'acquisition (isolation galvanique entre les voies de mesure) soit au niveau du capteur (soudure) - la longueur des câbles ou les interférences entraînées par l'instabilité des alimentations.

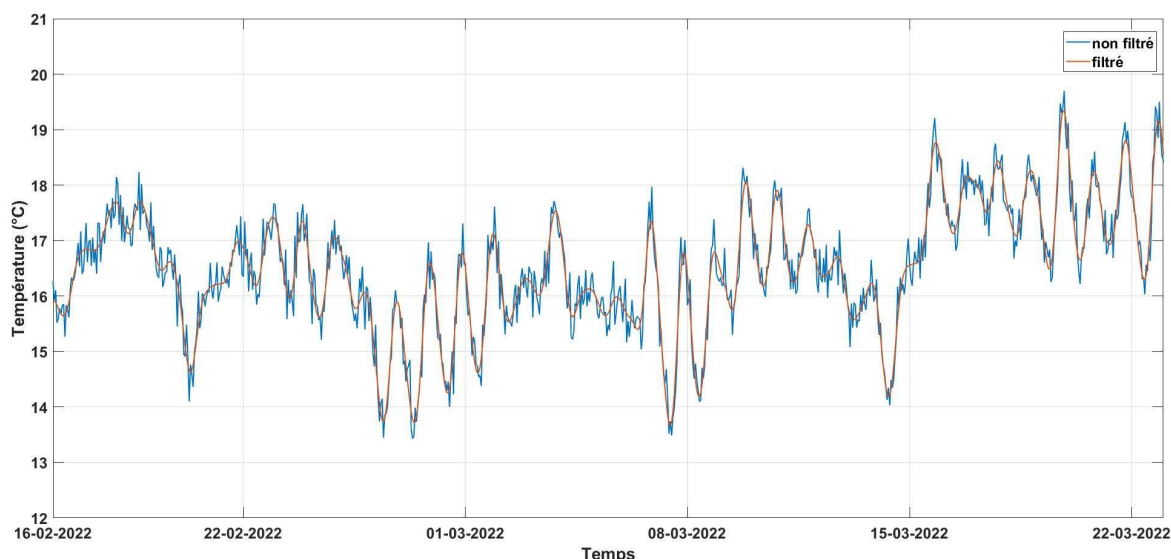


Figure 78 - Comparaison avant et après application d'un filtre gaussien pour les données de température d'un thermohygromètre.

### 3.3.1 Comportement thermique des parois

L'augmentation de la résistance thermique de l'enveloppe du bâtiment en appliquant des matériaux d'isolation thermique est généralement préconisée comme le facteur le plus crucial pour réduire la demande énergétique du bâtiment, en particulier dans les climats dominés par le chauffage. Par conséquent, de nombreux systèmes d'évaluation de la performance énergétique et normes imposent des exigences spécifiques à la résistance thermique (valeur R) ou à la transmission thermique (valeur U) des composants du bâtiment.

Cependant, ces indicateurs sont des représentations simplifiées du transfert de chaleur d'un composant de l'enveloppe du bâtiment, car ils ne tiennent compte d'aucun comportement dynamique. L'analyse dynamique est faite en exposant un bâtiment à des variations d'utilisation et de conditions environnementales telles que la température extérieure et le rayonnement solaire qui varient dans le temps.

Les données du banc expérimental *in-situ* sont donc utilisées pour évaluer la performance hygrothermique des revêtements étudiés. Dans un premier temps nous présentons l'étude statique, en supposant le régime permanent, préconisé par les normes, et dans un deuxième temps l'étude dynamique. Dans la partie suivante, nous présentons les différents indicateurs utilisés dans cette analyse.

### 3.3.1.1 Coefficient de transmission thermique (Valeur U)

La transmission thermique des façades détermine de façon globale la demande énergétique des bâtiments. Etant donné que les façades et les toitures sont les éléments de l'enveloppe du bâtiment qui contribuent le plus aux déperditions d'énergie, il est donc intéressant de disposer de méthodes permettant d'évaluer précisément ce paramètre.

En rénovation du bâti ancien, le coefficient de transmission thermique est un facteur clé à considérer. Plusieurs études ont suggéré que la caractérisation erronée des valeurs U pour les bâtiments historiques peut conduire à des politiques erronées et à des rénovations mal conçues (Rye et Scott, 2012 ; Rhee-Duverne et Baker, 2013). Cependant, sa détermination est particulièrement difficile en raison de la complexité technologique et de l'hétérogénéité constructive de ces bâtiments (Teni *et al.*, 2019).

Le coefficient de transmission thermique U est défini selon la norme (BSI, 2018) comme « le flux thermique en régime stationnaire divisé par l'aire et par la différence de température entre les surfaces environnantes situées de part et d'autre d'un système plan uniforme ». Pour un système *in-situ* le régime permanent est impossible à atteindre. Pour s'affranchir de cette problématique, la norme (BSI, 2014) propose de supposer que les valeurs moyennes du flux de chaleur et des températures sur une période de temps suffisamment longue donnent une bonne estimation du régime permanent.

Dans la suite nous présentons trois différentes méthodes de calcul pour la valeur U et les résultats obtenus pour les différentes configurations d'isolant étudiées.

### a Calcul théorique - ISO 6946

Le calcul théorique de la valeur  $U$  est fait selon la méthode simplifiée de la norme (BSI, 2017) (cf. équation (21)). La méthode de calcul est basée sur les résistances thermiques utiles<sup>3</sup> des matériaux pour l'application concernée.

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_{\text{se}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + R_{\text{si}}} \quad (21)$$

avec  $U$  le coefficient de transmission thermique [ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ],  $R_{\text{tot}}$  la résistance thermique totale [ $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ ],  $d$  l'épaisseur du matériau [ $\text{m}$ ],  $\lambda$  la conductivité thermique du matériau [ $\text{W}/(\text{m.K})$ ],  $R_{\text{si}}$  la résistance thermique superficielle côté intérieur [ $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ ] et  $R_{\text{se}}$  la résistance thermique superficielle côté extérieur [ $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ ].

Selon la norme,  $R_{\text{si}}$  est égal à  $0,13 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$  et  $R_{\text{se}}$  est égal à  $0,04 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$  pour les surfaces planes verticales.

### b Méthode fluxmétrique (HFM) - ISO 9869-1

En principe, la valeur de  $U$  peut être obtenue en mesurant *in-situ* le flux de chaleur à travers un élément avec un fluxmètre, ainsi que les températures des deux côtés de l'élément dans des conditions de régime permanent, comme montré sur la Figure 79.

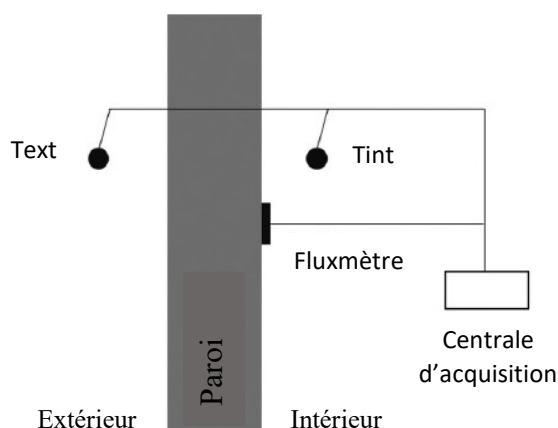


Figure 79 - Schéma de la méthode fluxmétrique selon (Teni *et al.*, 2019).

<sup>3</sup> La résistance thermique utile correspond à la valeur de la résistance thermique d'un produit de bâtiment dans des conditions extérieures et intérieures spécifiques pouvant être considérées comme typiques de la performance de ce matériau lorsqu'il est intégré dans un composant de bâtiment.

Sur le banc d'essais à Cahors, les fluxmètres ont été installés loin des ponts thermiques et des éventuelles fissures présentes sur le revêtement afin d'éviter les erreurs de mesure. Pour cela, une étude par caméra thermique a été réalisée avant le positionnement des capteurs afin de situer les hétérogénéités de la paroi. De plus, les appareils de chauffage sont à une distance de plus de 2 m des surfaces instrumentées.

La valeur  $U$  est donc calculée selon la méthode des moyennes préconisée par la norme ISO 9869-1, selon l'équation (22).

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{intj} - T_{extj})} \quad (22)$$

avec  $U$  la transmittance thermique [ $W/(m^2.K)$ ],  $q$  la densité de flux thermique [ $W/m^2$ ],  $T_{int}$ ,  $T_{ext}$  les températures environnementales intérieure et extérieure respectivement [ $K$ ] et l'indice «  $j$  » énumère les mesures individuelles.

Dans le cadre des mesures *in-situ* la résistance thermique (ou valeur  $R$ ) d'un élément peut aussi être estimée, comme montré sur l'équation (23). Son calcul est important car cette valeur est utilisée comme paramètre d'arrêt du calcul de la valeur  $U$  comme ce sera détaillé dans la suite.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sintj} - T_{sextj})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (23)$$

avec  $R$  la résistance thermique [ $m^2.K/W$ ],  $q$  la densité de flux thermique [ $W/m^2$ ],  $T_{sint}$ ,  $T_{sext}$  les températures de surface intérieure et extérieure respectivement [ $K$ ] et l'indice «  $j$  » énumère les mesures individuelles.

La norme préconise une durée minimale du test de 72 h si la température est stable autour du fluxmètre. Sinon, cette durée peut aller jusqu'à plusieurs jours, sur une période qui est un multiple entier de 24 h. Le calcul de la valeur  $U$  se termine lorsque :

- la valeur  $R$  obtenue à la fin de l'essai ne s'écarte pas de plus de 5% de la valeur obtenue 24 h auparavant ;

et

- la valeur R obtenue en prenant les données pendant les premiers 2/3 de la période totale analysée en jours ne s'écarte pas de plus de 5% des valeurs obtenues à partir des données de la dernière période de même durée.

Cette méthode est valide si les variations de chaleur stockées dans le mur sont négligeables par rapport à la chaleur traversant la paroi et si les propriétés thermiques des matériaux et les coefficients de transfert de chaleur sont constants sur la plage de fluctuations de température se produisant pendant l'essai.

Dans notre cas, nous proposons deux solutions pour s'affranchir des variations des conditions aux limites *in-situ* (température, vent, rayonnement solaire) : le choix judicieux de la période analysée et l'utilisation des données de températures en contact direct avec la surface étudiée à la place des températures environnantes, comme préconisé par (Baker 2011).

Nous présentons une comparaison avec les données obtenues entre les deux étages étudiés (côté pan de bois R+1 et R+2) pendant la première période de chauffe du bâtiment afin de garder un écart important (environ 10°C) entre les températures intérieure et extérieure et réduire les incertitudes sur la valeur U.

Pour éviter les effets du rayonnement solaire de la façade instrumentée (côté ouest) et selon les préconisations de la norme (BSI, 2014), l'analyse a été effectuée seulement sur des données acquises la nuit (entre minuit et 6h du matin). Cette approche a été utilisée et validée par d'autres chercheurs comme (Labat *et al.*, 2015) par exemple. Une comparaison avec la valeur calculée pour toute la journée est aussi présentée afin de pouvoir confronter les résultats avec les valeurs obtenues au R+1 par (Claude, 2018).

### Etage R+2 - Mur ossature en pan de bois et revêtement en polystyrène et plâtre

Nous présentons d'abord la période choisie pour l'analyse. Pour la configuration en polystyrène et plâtre de la paroi au R+2, le chauffage a été allumé début mars 2021 et désactivé début mai 2021. La Figure 80 présente les données de température de surface externe ( $T_{\text{sext}}$ ) et interne ( $T_{\text{shint}}$ ) ainsi que la température ambiante ( $T_{\text{amb}}$ ) pour cette période. La consigne du chauffage est de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1$ .

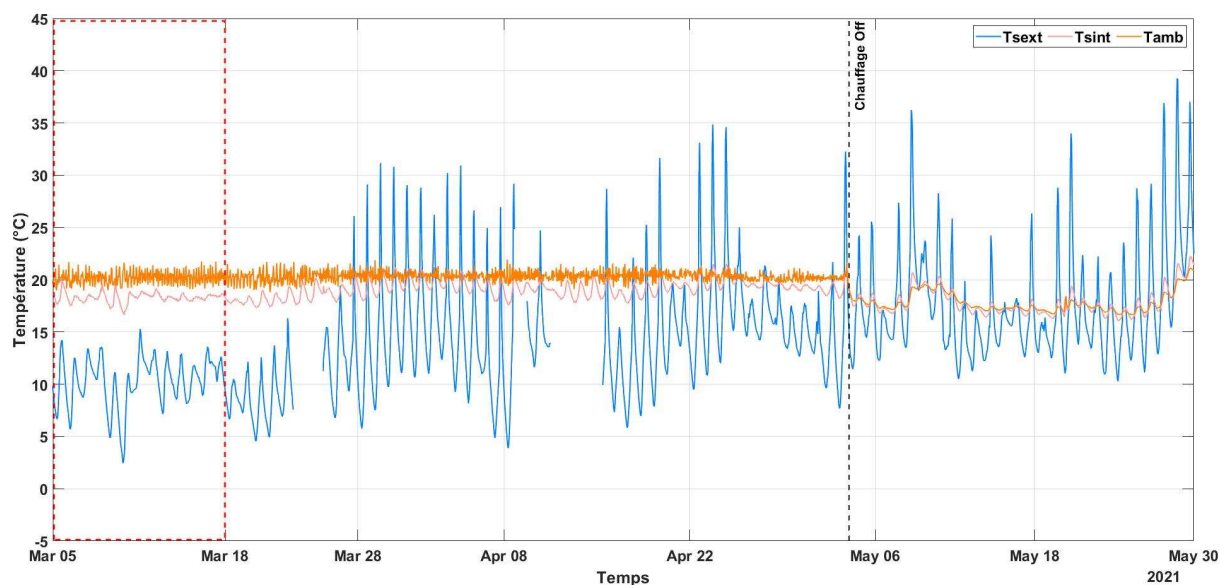


Figure 80 - R+2 - Relevé du 05 Mars au 30 Mai 2021.

La période encadrée en pointillé rouge correspond aux plus faibles variations de température de surface externe car le temps était nuageux et l'influence du rayonnement solaire était donc moins importante.

Les valeurs obtenues pour la valeur U, calculées pour toute la journée [24h] et pendant la nuit [0h-6h], sont montrées sur la Figure 81. Dans le premier cas, la valeur se stabilise à  $0,66 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  et dans le deuxième à  $0,53 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ .

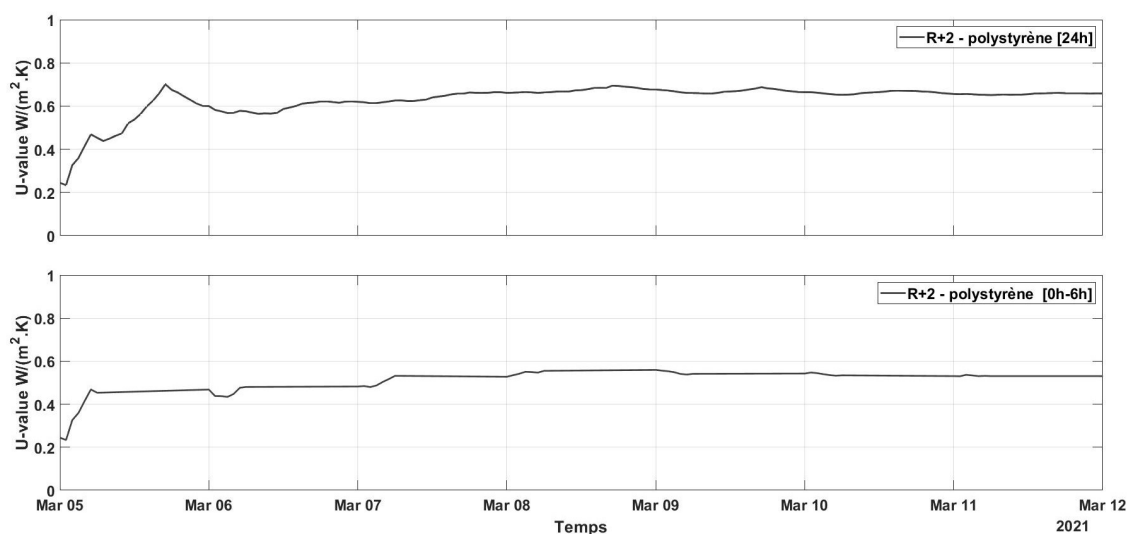


Figure 81 - Coefficient de transmission thermique au R+2 selon la méthode fluxmétrique.

### Etage R+1 - Pièce 1 - mur ossature en pan de bois et revêtement en béton de chanvre banché

Au R+1 les fluxmètres ont été installés en novembre 2021 pendant la deuxième période de chauffe du bâtiment. La Figure 82 présente les données de température de surface externe (T<sub>sext</sub>) et interne (T<sub>sint</sub>) aussi bien que la température ambiante (T<sub>amb</sub>) pour cette période pour la pièce 1 (pan de bois) du R+1.

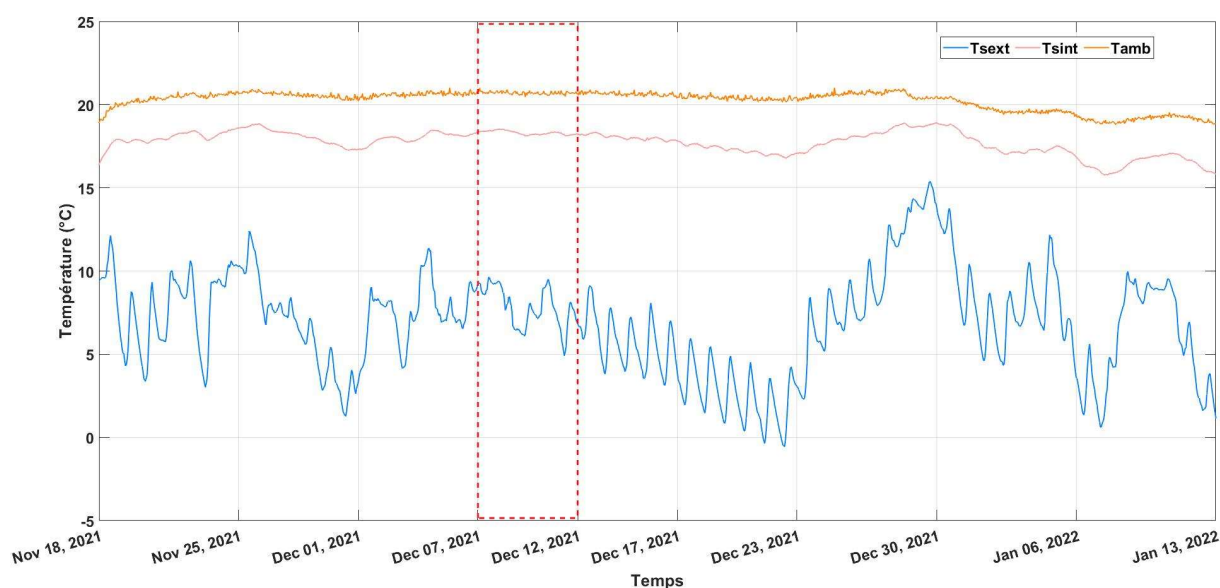


Figure 82 - R+1 - Pièce 1 - Relevé du 18 Novembre au 13 Janvier 2022.

L'intervalle encadré en pointillé rouge correspond aux plus petites variations de température de surface externe pour la période analysée et le coefficient de transmission thermique a donc été calculé sur cette durée.

Pour la pièce 1 (R+1), les valeurs obtenues pour toute la journée [24h] et pendant la nuit [0h-6h] sont montrées sur la Figure 83. Dans le premier cas, la valeur se stabilise à 0,54 W/(m<sup>2</sup>.K) et dans le deuxième à 0,52 W/(m<sup>2</sup>.K).

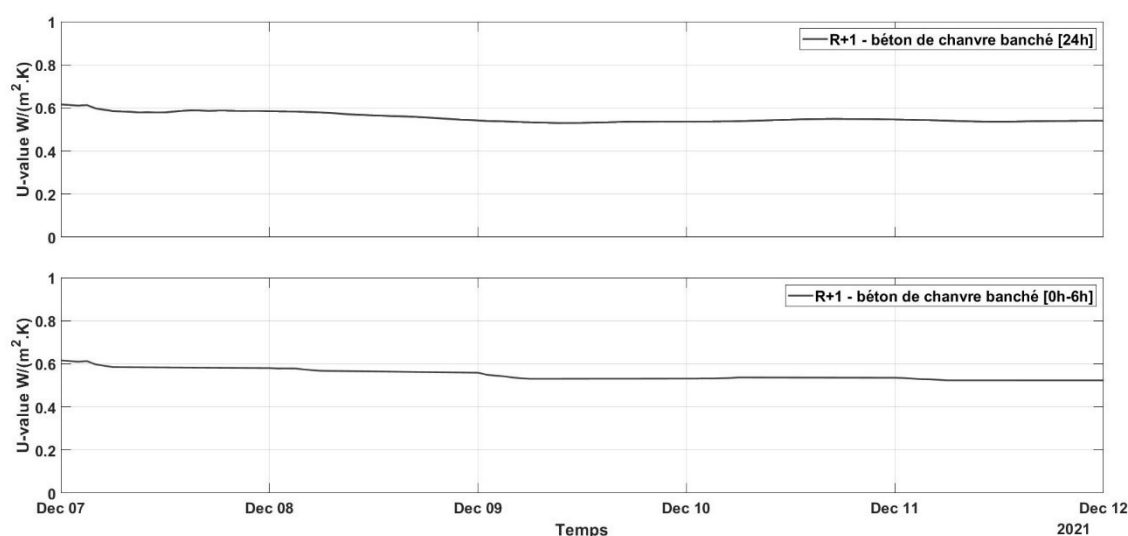


Figure 83 - Coefficient de transmission thermique au R+1 selon la méthode fluxmétrique.

Pour la pièce 2 les valeurs de densité de flux obtenues sont beaucoup plus élevées que celles obtenues pour la pièce 1 de même typologie constructive. Il est possible que la chaleur dégagée par le système d'acquisition (centrale, alimentation, ordinateur, onduleur, *etc.*) et que les dimensions plus petites de cette pièce influencent les mesures. En conséquence, les valeurs U de cette pièce ne seront pas présentées et les comparaisons seront uniquement menées entre la pièce 1 au R+1 et le R+2, les deux présentant la même typologie constructive en pan de bois.

En ce qui concerne la pièce 3, en briques massives, nous ne présentons pas les calculs pour la méthode fluxmétrique car nous n'avons pas disposé de capteur de température sur la façade externe, les fenêtres ayant été condamnées avant la mise en place du banc d'essai.

### Etage R+2 - Mur ossature en pan de bois et revêtement en béton de chanvre préfabriqué

Pour les plaques préfabriquées en béton de chanvre au R+2, une deuxième période de chauffe du bâtiment a été imposée entre mi-novembre 2021 et fin mars 2022. La Figure 84 présente les données de température de surface externe ( $T_{\text{sext}}$ ) et interne par type de liant ( $T_{\text{sint CHMK}}$  et  $T_{\text{sint LTCH}}$ ) ainsi que la température ambiante ( $T_{\text{amb}}$ ) pour cette période.

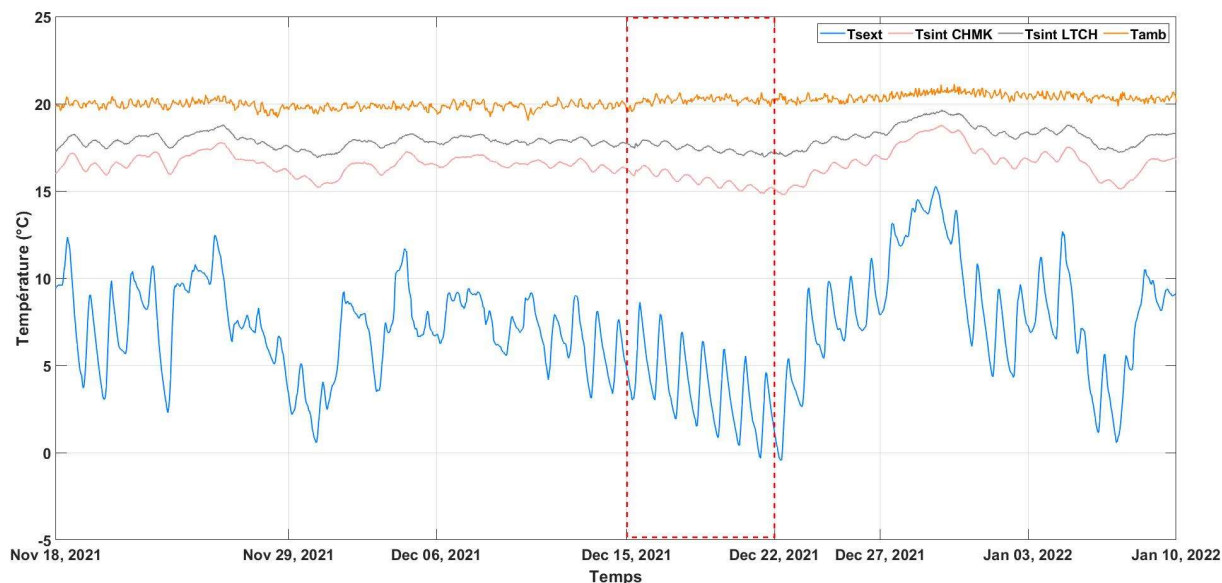


Figure 84 - R+2 - Relevé du 18 Novembre 2021 au 10 Janvier 2022 pour le revêtement en plaques préfabriquées de béton de chanvre.

Les fluxmètres sur les blocs de CHMK ont été enlevés pour la réalisation de tests au laboratoire et remis en place sur site le 15 décembre 2021. L'encadré en pointillés rouges correspond aux plus petites amplitudes de température de surface externe en présence des fluxmètres sur les deux surfaces analysées, le coefficient de transmission thermique a donc été calculé sur cette durée.

Les valeurs obtenues pour toute la journée [24h] et pendant la nuit [0h-6h] pour les blocs en CHMK et LTCH sont montrées sur la Figure 85. Pour les blocs en CHMK, la valeur se stabilise à  $0,83 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  [24h] et à  $0,71 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  [0h-6h]. Pour les blocs en LTCH, la valeur se stabilise à  $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  [24h] et à  $0,66 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  [0h-6h].

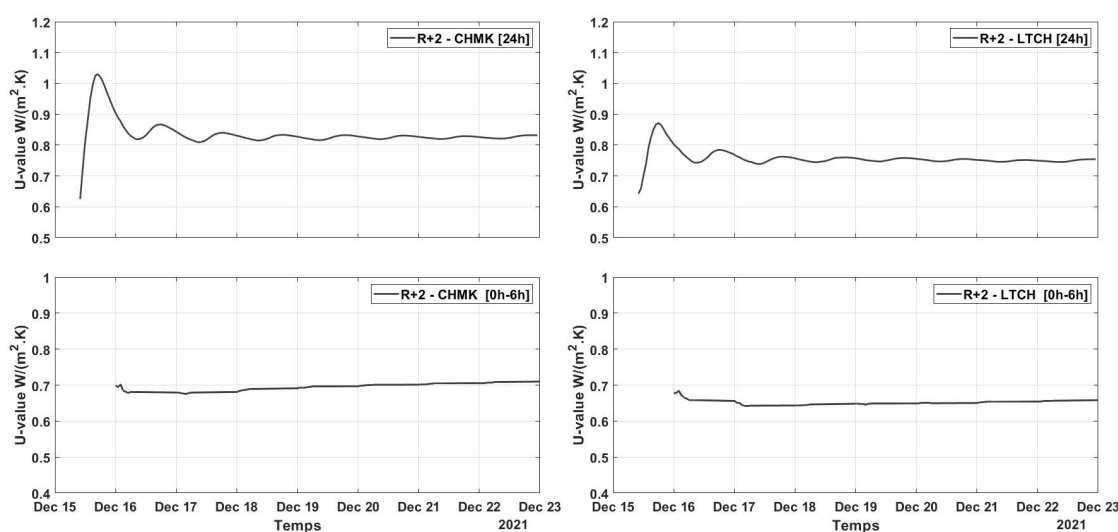


Figure 85 - Coefficient de transmission thermique au R+2 selon la méthode fluxmétrique pour les plaques préfabriquées en béton de chanvre.

### c Méthode basée sur la température (TBM)

La méthode basée sur la température est une méthode non normalisée relativement nouvelle et simple, utilisée pour effectuer des mesures *in-situ* de la valeur U. La procédure de mesure ne nécessite la surveillance que de trois températures : la température ambiante intérieure ( $T_{int}$ ), la température ambiante extérieure ( $T_{ext}$ ) et la température de surface intérieure ( $T_{sint}$ ) de la paroi comme montré sur la Figure 86.

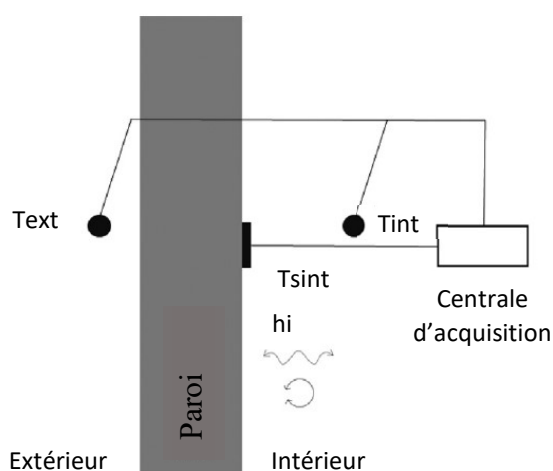


Figure 86 - Schéma de la méthode basée sur la température selon (Teni *et al.*, 2019).

La méthodologie sous-jacente à cette méthode est basée sur les phénomènes convectifs (lois de Newton), qui stipule que le taux de transfert de chaleur est proportionnel à la différence de température entre un corps et son environnement et à la superficie de la surface. La valeur  $U$  est donc calculée selon l'équation (24) pour chaque mesure et le résultat est la valeur moyenne pour la période analysée.

$$U = h_i \frac{T_{int} - T_{sint}}{T_{int} - T_{ext}} \quad (24)$$

avec  $U$  la transmittance thermique [ $W/(m^2.K)$ ],  $h_i$  le coefficient d'échange thermique superficiel interne [ $W/(m^2.K)$ ],  $T_{int}$  et  $T_{ext}$  les températures ambiantes intérieure et extérieure respectivement [K] et  $T_{sint}$  la température de surface interne [K].

La littérature souligne comme principal avantage de cette méthode le fait de ne pas utiliser les fluxmètres (ce qui permet de réaliser plus facilement les essais et évite la perturbation du flux thermique à travers la paroi provoquée par l'utilisation du fluxmètre) mais aussi de réduire les erreurs associées aux mesures (Bienvenido-Huertas *et al.*, 2018). Cependant, il est conseillé d'avoir une différence significative entre les températures interne et externe, de préférence supérieure à 15°C, ce qui peut être difficile pour certains climats ou certaines saisons.

Pour les calculs avec la méthode basée sur la température, le coefficient d'échange thermique superficiel interne est égal à 7,69  $W/(m^2.K)$  (BSI, 2017) et les valeurs  $U$  sont obtenues seulement pour les différences de température égales ou supérieures à 15°C. Les températures ambiantes internes sont obtenues depuis les capteurs de type KIMO. Les températures ambiantes externes proviennent de la station météorologique et les températures de surface internes des thermocouples liés à la centrale d'acquisition.

#### d Résultats de la détermination des valeurs $U$ des différentes parois

La Figure 87 résume et compare les valeurs obtenues par (Claude, 2018) avant et après rénovation au R+1 ainsi que les valeurs obtenues dans cette étude par la méthode fluxmétrique (HFM) et la méthode basée sur la température (TBM). Pour le calcul théorique de la valeur  $U$ , Claude a caractérisé deux types de briques foraines, datées du 16<sup>ème</sup> et 18<sup>ème</sup> siècles. Les conductivités thermiques de chaque typologie sont prises en compte pour les calculs de la valeur  $U$  et les résultats sont représentés pour  $\lambda_{16e}$  et  $\lambda_{18e}$ , respectivement.

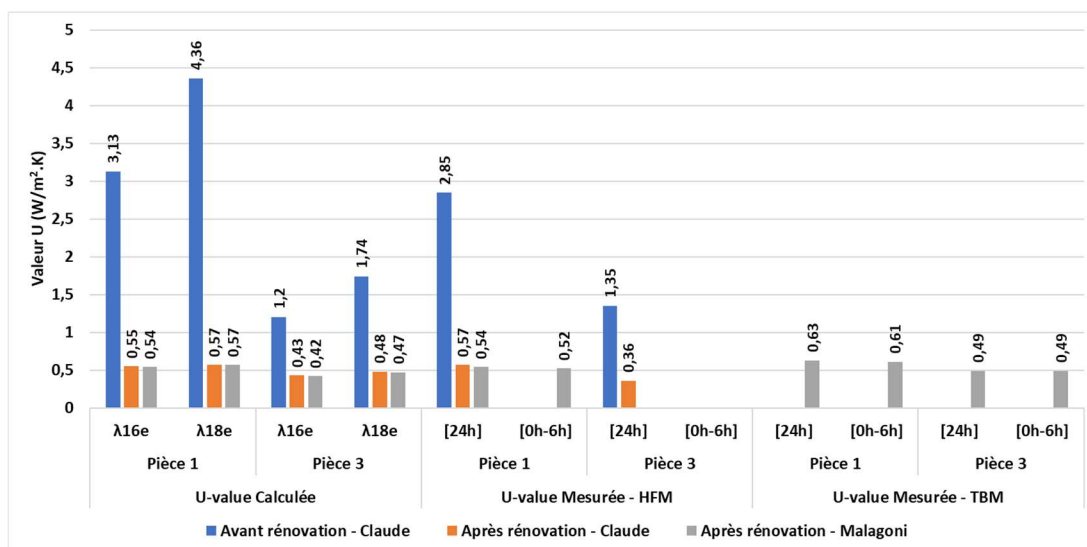


Figure 87 - Comparaison des valeurs U au R+1.

On observe que les valeurs obtenues pour les pièces 1 et 3 dans cette étude sont en accord avec les valeurs obtenues par (Claude, 2018). Les écarts observés entre les valeurs calculés après rénovation par Claude (2018) et dans cette thèse sont dus aux erreurs d'arrondi. La méthode basée sur la température surestime légèrement les transmittances thermiques par rapport à la méthode fluxmétrique.

La Figure 88 présente les mêmes comparaisons au R+2 avec les deux configurations étudiées, en polystyrène et en béton de chanvre préfabriqué pour les deux types de liants utilisés.

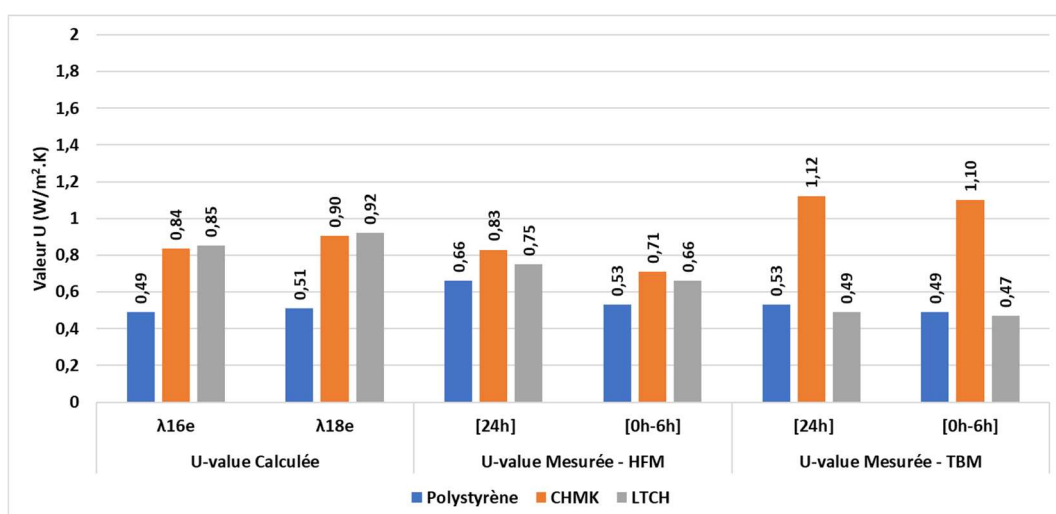


Figure 88 - Comparaison des valeurs U au R+2.

Pour faciliter l'interprétation, sur la Figure 89, nous avons enlevé les données relatives à la paroi en brique du R+1 et les données avant rénovation de la pièce 1 pour comparer seulement les données obtenues pour les mesures réalisées dans cette thèse sur les deux étages en pan de bois.

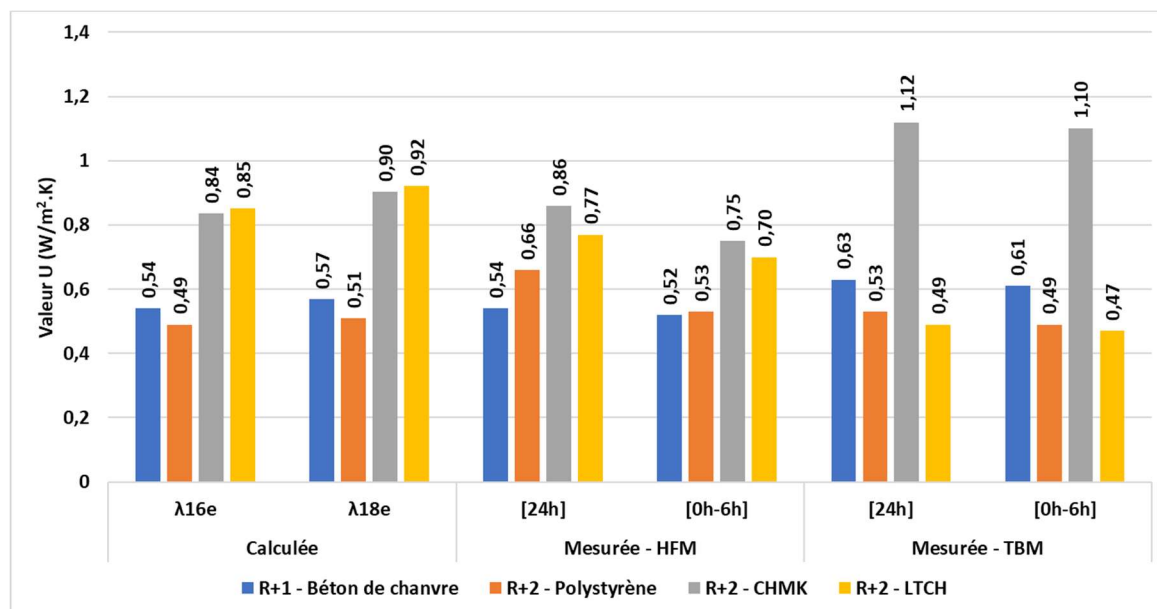


Figure 89 - Comparaison des valeurs U sur les deux étages (seulement les données calculées pendant cette thèse).

On observe que les valeurs U calculées et mesurées selon les différentes méthodes, pour la paroi en polystyrène au R+2 et pour la paroi en béton de chanvre banché au R+1 (pièce 1), présentent le même ordre de grandeur. Cependant, les valeurs mesurées par la méthode basée sur la température (TBM) pour les plaques préfabriquées LTCH et CHMK positionnés au R+2 diffèrent des valeurs calculées.

Cette différence peut s'expliquer par la difficulté de mesurer une température de surface. Pour la paroi au R+2, la température ambiante et la température externe sont les mêmes pour les deux types de plaques. Seule la température de surface interne du revêtement est propre à chaque matériau. On constate qu'une variation de 1°C sur la température de surface entraîne une variation d'environ 50% sur le résultat de la valeur U.

Au R+2, les températures de surface pour le revêtement en LTCH sont plus élevées que celles pour le revêtement en CHMK à cause de leur position sur la paroi. Les blocs en LTCH sont placés sur la moitié supérieure de la surface étudiée (cf. Figure 71b). En conséquence, les

thermocouples en surface sont plus influencés par la convection entraînée par la mise en route des radiateurs. Cela est illustré sur la Figure 90, où les lignes en pointillé représentent les thermocouples positionnés sur les plaques de LTCH et les lignes pleines les thermocouples positionnés sur les plaques de CHMK.

Cette influence de la mise en route des radiateurs est aussi mise en évidence par les écarts plus petits lorsque les températures de surface atteignent la valeur de consigne ( $20^{\circ}\text{C} \pm 1$ ) et plus importantes lorsque les températures extérieures chutent, moment où les radiateurs s'allument.

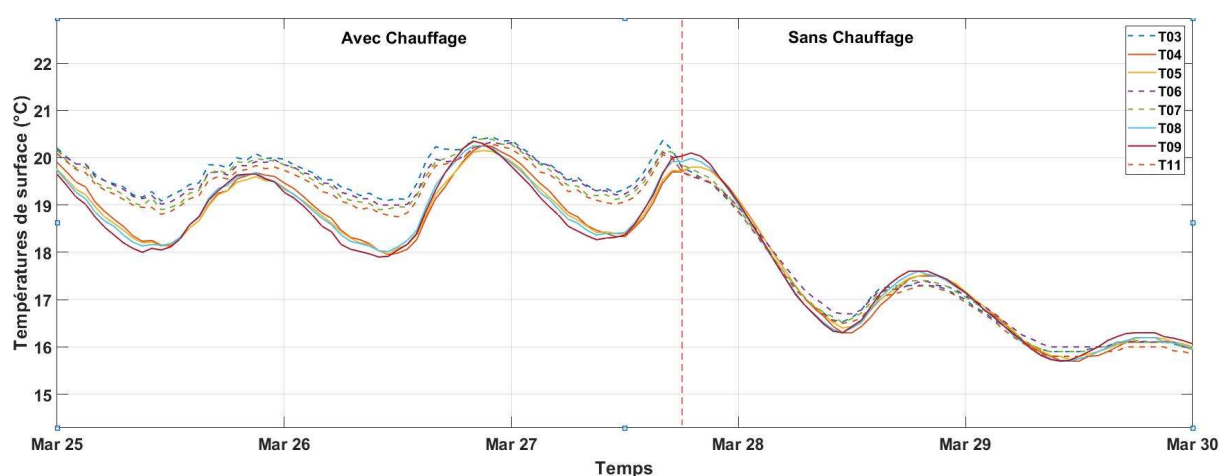


Figure 90 - Comparaison des températures de surface au R+2 avec et sans chauffage. Les lignes en pointillées représentent les thermocouples sur les plaques en LTCH (positionnés au-dessus) et les lignes pleines ceux sur les plaques de CHMK (positionnés en dessous).

Dans un deuxième temps, il est important de souligner que le calcul de la valeur  $U$  est influencé par la température à l'intérieur de la pièce (cf. équation (24)). Or, la façade du R+2 n'a été que partiellement rénovée avec les plaques préfabriquées en béton de chanvre (environ 33% de la surface totale). Ainsi la température ambiante est majoritairement influencée par le revêtement en polystyrène (77% de la surface totale). Cette méthode par le calcul n'est donc pas recommandée pour la configuration appliquée au R+2.

Globalement, pour la méthode fluxmétrique, les mesures sont plus influencées par le rayonnement solaire, et l'analyse en prenant en compte les valeurs entre 0h et 6h est recommandée. Pour la méthode basée sur la température sur les façades entièrement rénovées, l'analyse pour les deux périodes ne semble pas avoir un effet important. Cela s'explique par la prise en compte des températures de surface externe par la méthode fluxmétrique tandis que

pour la méthode basée sur la température ce sont les températures ambiantes externes (obtenues par la station météo). En prenant en compte les températures de surface, l'influence du rayonnement solaire est mise en évidence.

Comme souligné par (Verbeke et Audenaert, 2018), les valeurs  $U$  sont des représentations simplifiées du transfert de chaleur d'un composant de l'enveloppe du bâtiment, car ces indicateurs ne tiennent compte d'aucun comportement dynamique.

En situation transitoire, la masse thermique d'un bâtiment peut absorber, emmagasiner et restituer progressivement de la chaleur en fonction de l'écart de température avec l'environnement immédiat. La quantité de chaleur stockée dépend de la masse volumique  $\rho$  et de la capacité thermique spécifique  $C$  du matériau, tandis que le taux d'échange de chaleur est influencé par la conductivité thermique  $\lambda$  du matériau. Les bâtiments avec une grande quantité de masse thermique à l'intérieur de l'enveloppe thermique afficheront une réaction réduite et retardée à une excitation initiale telle qu'une augmentation soudaine de la température ambiante extérieure. Ce comportement transitoire est appelé l'inertie thermique d'un bâtiment.

### 3.3.1.2 Réponse dynamique

L'inertie thermique est une caractéristique primordiale dans l'appréciation de la thermique d'un bâtiment. Elle correspond à la capacité dynamique du bâtiment, par le biais des matériaux dont il est composé, d'emmagasiner de la chaleur qui sera restituée ultérieurement. Cette inertie thermique aura deux effets principaux à savoir : limiter les variations de la température (amortissement) et décaler dans le temps les pics de température (déphasage). C'est donc un paramètre indispensable pour évaluer la qualité d'un système isolant.

Le déphasage détermine le temps nécessaire à la chaleur pour traverser une épaisseur donnée d'un matériau et l'amortissement (ou facteur d'atténuation) est donné par le ratio entre l'amplitude de l'excitation de température ( $A_e$ ) et l'amplitude de la réponse ( $A_i$ ). C'est un facteur sans dimension qui exprime le changement d'amplitude d'une onde de chaleur sinusoïdale se propageant à travers un élément de construction (Verbeke et Audenaert, 2018). Il correspond à un pourcentage de l'amplitude de la courbe de température intérieure par rapport à l'amplitude de l'excitation à l'extérieur. Plus l'amortissement est petit, plus l'inertie de la paroi est importante.

Ces paramètres pour quantifier l'inertie thermique sont représentés sur la Figure 91.

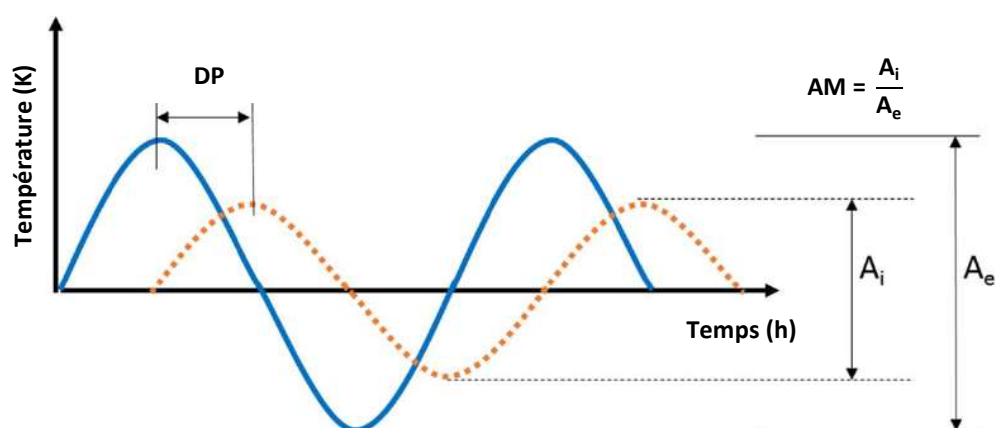


Figure 91 - Phénomènes de déphasage (DP) et amortissement (AM). La courbe bleu continue représente les variations de température de surface à l'extérieur de la paroi et la courbe orange en pointillés à l'intérieur (Verbeke et Audenaert, 2018).

Néanmoins, un isolant, par sa pose, sa position, sa nature, ses caractéristiques physiques, modifie les transferts thermiques au sein de la paroi et affecte l'inertie du bâti et celle de la paroi. Dans le cas de charges thermiques internes durant la journée (occupant, rayonnement solaire entrant ou infiltration d'air chaud), l'isolation par l'intérieur peut favoriser la surchauffe, notamment en été où l'air chaud reste confiné à l'intérieur. Nous étudions donc ici l'inertie thermique des façades instrumentées afin d'évaluer le comportement du revêtement biosourcé face à des sollicitations estivales.

A l'échelle de la pièce, (Claude, 2018) a constaté que le déphasage ainsi que l'amortissement n'ont presque pas été modifiés avant et après rénovation (avec 15 cm de béton de chanvre banché) pour les parois en briques massives et en pan de bois au R+1. Alors que l'inertie de la paroi est importante, celle de la pièce a oscillé autour d'une heure, pour les deux typologies constructives. L'auteur a donc confirmé que la paroi extérieure d'un bâtiment ne dicte qu'en partie le comportement thermique de l'air intérieur. De plus, la forte perméabilité à l'air des bâtiments anciens influence fortement la température de l'air intérieur.

Afin de pouvoir comparer nos différents types d'isolant, nous choisissons d'étudier la réponse de la paroi sur une période estivale. Cependant, les isolants n'ont pas été posés en même temps, il faut donc choisir minutieusement les périodes où nous effectuerons les analyses. Pour ce faire, il faut que sur ces périodes la température moyenne extérieure soit la plus stable possible et que les amplitudes de température soient similaires. Ces conditions ont été réunies du 5 au 8 août

2021 pour le revêtement biosourcé au R+1 et la paroi nue au R+2, et du 08 au 11 juin 2021 pour le polystyrène.

#### a Etage R+1 - Mur ossature en pan de bois et revêtement en béton de chanvre banché

Nous commençons par présenter les résultats au R+1<sup>4</sup>. La Figure 92 montre les évolutions des températures de surface pour la paroi en pan de bois (pièce 1) pour la période du 05/09/2021 au 08/09/2021.

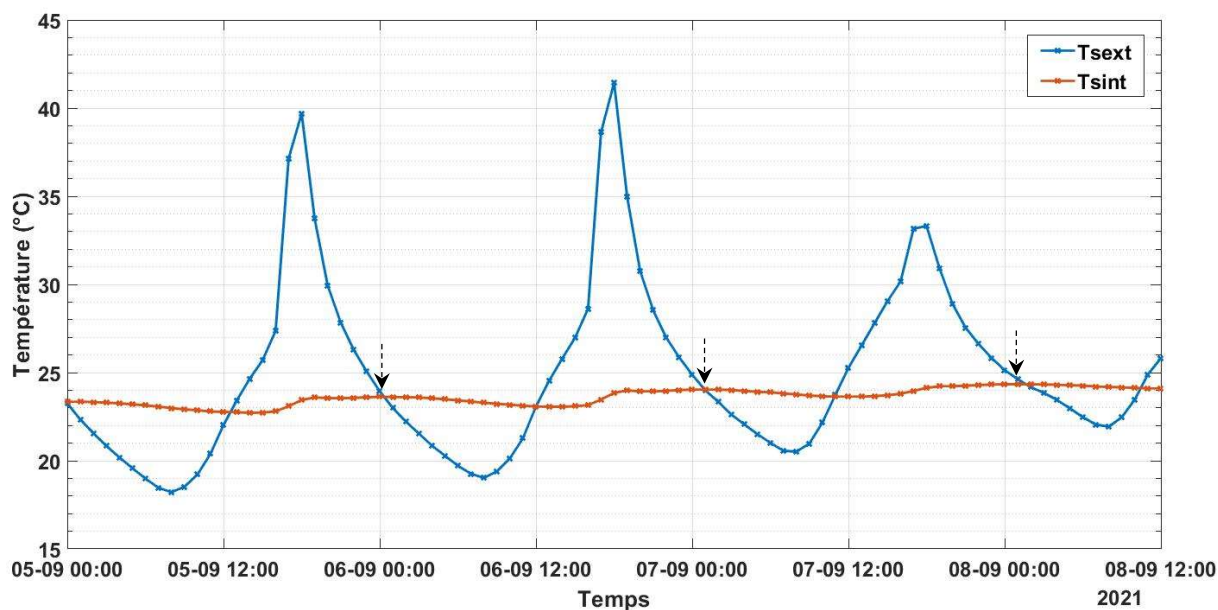


Figure 92 - Evolution des températures de surface pour la paroi en pan de bois avec revêtement en béton de chanvre banché au R+1.

Les pics de température de surface intérieure maximale étant difficiles à visualiser, nous les avons indiqué par des flèches. Les valeurs de déphasage et d'amortissement pour le béton de chanvre banché sont respectivement de 8,33h et 0,05.

#### b Etage R+2 - Mur ossature en pan de bois sans isolant (nu) et rénovée avec polystyrène

La Figure 93 présente les évolutions des températures de surface interne et externe pour le R+2 avec la paroi en pan de bois nue. La période analysée est la même que pour la pièce 1 (béton de

<sup>4</sup> En ce qui concerne la paroi en briques, nous n'avons pas de capteur de température sur la façade externe, les fenêtres ayant été condamnées avant la mise en place du banc d'essai. Nous ne présenterons donc pas d'analyse sur l'inertie thermique pour cette typologie constructive.

chanvre banché) présentée précédemment. Pour les capteurs placés en surface externe du côté pan de bois, on observe que les températures obtenues au R+2 et au R+1 sont les mêmes (comparaison de  $T_{\text{ext}}$  entre la Figure 92 et la Figure 93).

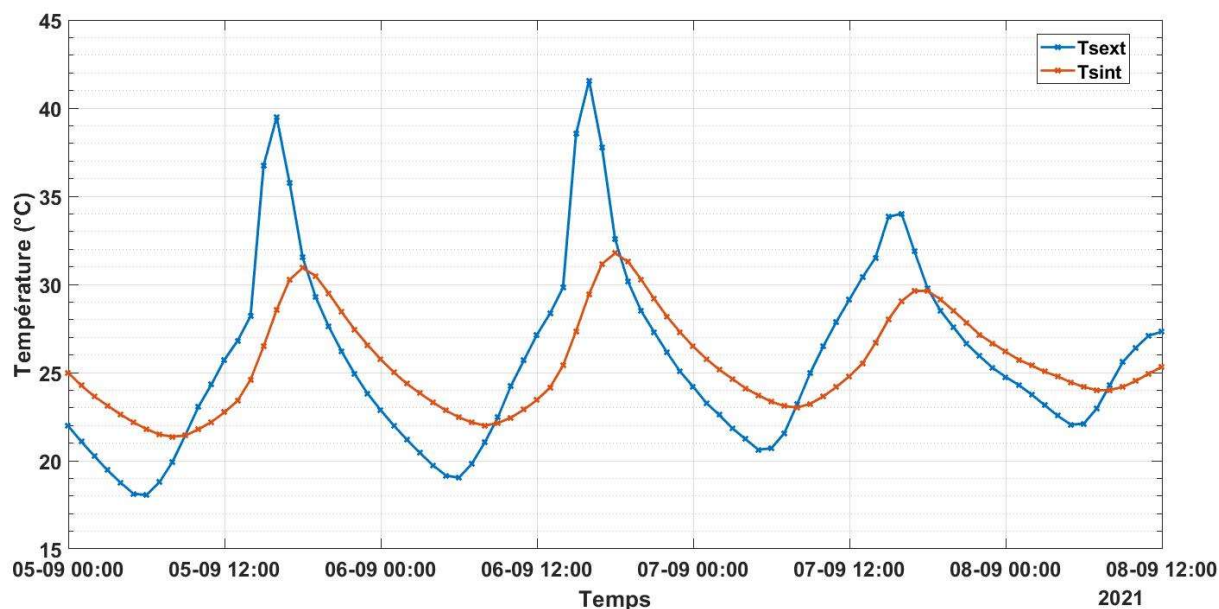


Figure 93 - Evolution des températures de surface pour la paroi nue en pan de bois au R+2.

Pour la paroi nue on observe que le déphasage et l'amortissement sont très faibles. Le premier vaut 2,00h et le second 0,46.

La Figure 94 présente les évolutions des températures de surface interne et externe pour la période du 08/06/2021 au 11/06/2021, pendant laquelle nous avons la configuration avec la rénovation historique en polystyrène et plâtre<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Cette étude n'a pas été effectuée pour les blocs préfabriqués de béton de chanvre posés au R+2 car le système de mesure a été arrêté fin avril 2022. Nous n'avons donc pas encore de données pendant l'été pour cette configuration.

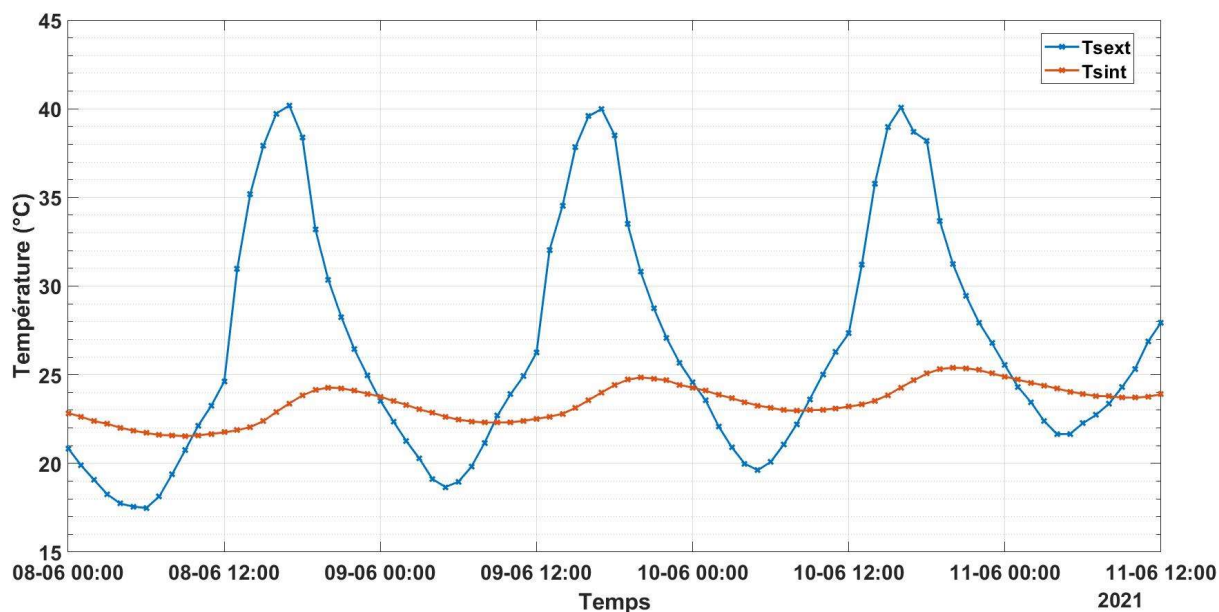


Figure 94 - Evolution des températures de surface pour la paroi en polystyrène au R+2.

On observe que le déphasage et l'amortissement augmentent par rapport à la paroi nue en présence du revêtement en polystyrène. Pour le polystyrène le déphasage est égal à 3,50h et l'amortissement à 0,12.

La Figure 95 présente une comparaison entre les données de déphasage et d'amortissement obtenues pour le R+1 avec le revêtement en béton de chanvre banché et pour le R+2 avec les configurations polystyrène et paroi nue.

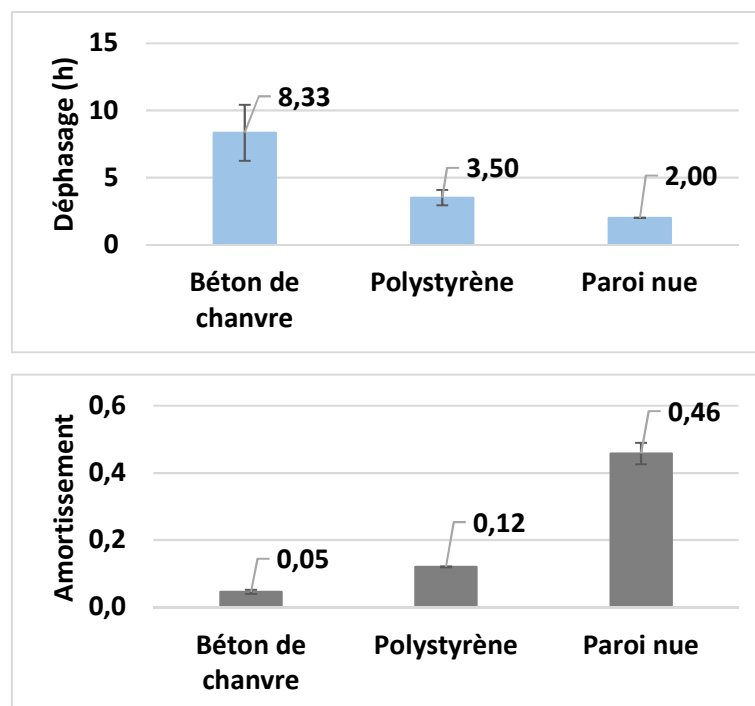


Figure 95 - Déphasage et amortissement des configurations étudiées. Les barres d'erreurs représentent les écart-types des valeurs obtenues sur 3 journées.

La Figure 95 haut montre clairement une différence de temps de déphasage avec un temps de déphasage plus important pour le béton de chanvre banché au R+1 (8,3h) et un temps de déphasage plus faible au R+2 pour la paroi nue (2h), le revêtement en polystyrène et plâtre au R+2 présentant un temps intermédiaire (3,5h). Cela peut s'expliquer par la forte capacité thermique volumique ( $\rho.C$ ) du revêtement biosourcé par rapport au polystyrène. Le béton de chanvre présente une diffusivité thermique plus petite et donc un temps de réponse aux sollicitations extérieures (déphasage) plus élevé, ainsi qu'une effusivité plus importante que celle du polystyrène, donc une capacité à stocker la fraîcheur plus intéressante.

La Figure 95 bas montre clairement une différence d'amortissement avec la valeur la plus faible pour le béton de chanvre banché au R+1 (0,05) et la valeur la plus élevée au R+2 pour la paroi nue (0,46), le revêtement en polystyrène et plâtre au R+2 présentant une valeur intermédiaire (0,12). Ainsi, plus petite est la variation de température à l'intérieur du bâtiment, plus petit sera l'amortissement et donc l'inertie de la paroi sera plus importante. Ceci montre l'efficacité du revêtement biosourcé face à des sollicitations estivales.

Pour la paroi nue et le revêtement biosourcé, les valeurs sont concordantes avec celles obtenues par (Claude, 2018). Les incertitudes, représentées par les barres d'erreurs, correspondent à l'écart-type calculé sur les 3 journées choisies. Cependant, le système n'est pas en régime permanent. Cela signifie donc que les résultats représentent uniquement un ordre de grandeur et que les incertitudes peuvent être plus importantes.

En situation transitoire, la masse (ou inertie) thermique d'un bâtiment peut absorber, emmagasiner et restituer progressivement de la chaleur en fonction de l'écart de température avec l'environnement immédiat. La quantité de chaleur stockée dépend de la densité  $\rho$  et de la capacité thermique spécifique  $C$  du matériau, tandis que le taux d'échange de chaleur est influencé par la conductivité thermique  $\lambda$  du matériau (Verbeke et Audenaert, 2018).

La résistance thermique, même à un niveau moins important, semble être un paramètre influent. Alors qu'au R+2 la couche isolante fait 5 cm avec une conductivité thermique de 0,04 W/m.K, soit une résistance thermique de 1,25 m<sup>2</sup>.K/W, au R+1 la couche isolante fait 15 cm avec une conductivité thermique de 0,107 W/m.K, soit une résistance de 1,40 m<sup>2</sup>.K/W (12% de plus).

### 3.3.2 Comportement hydrique des parois

Les rénovations énergétiques ont le potentiel de réduire la consommation d'énergie et les émissions de carbone des bâtiments mais font face à des défis particuliers lorsqu'elles sont mises en œuvre dans des bâtiments anciens. La rénovation de ces bâtiments est un exercice d'équilibre complexe, dans lequel de nombreux critères sont évalués les uns par rapport aux autres afin d'obtenir une utilisation continue et à long terme du bâtiment (Webb, 2017).

Comme cela a été indiqué dans l'étude bibliographique, l'isolation thermique par l'intérieur peut bouleverser l'équilibre hygrothermique de la paroi et est susceptible d'entraîner une modification de sa capacité de séchage, un risque de condensation interstitielle, l'apparition de moisissures ainsi que la détérioration des éléments encastrés dans la maçonnerie, tels que les extrémités des poutres en bois. Il est donc essentiel de valider la performance hygrothermique de la paroi après isolation en s'appuyant sur des outils et des méthodes fiables qui permettent de qualifier au mieux les solutions d'isolations choisies. Une de ces méthodes consiste à réaliser des mesures *in-situ* de température et d'humidité relative sur l'enveloppe du bâtiment, ce que nous présentons par la suite.

En ce qui concerne le transfert de vapeur, il peut être délicat d'étudier directement les mesures d'humidité relative car elles dépendent fortement de la température. L'humidité absolue, qui représente le rapport massique de l'eau dans l'air sec et est dérivée de la pression partielle de vapeur, comme montré sur l'équation (25), est un paramètre plus pertinent car, étant dérivé de la pression de vapeur, il dépend moins de la température par rapport à l'humidité relative (Labat *et al.*, 2015). Nous avons donc sélectionné cette grandeur pour représenter le transfert de masse à l'intérieur des murs.

$$HA = 0,622 \times \left( \frac{p_v}{101300 - p_v} \right) \quad (25)$$

avec  $HA$  l'humidité absolue [kg/kg d'air sec] et  $p_v$  la pression de vapeur [Pa].

La pression de vapeur est calculée à partir de la pression de vapeur saturante, celle-ci étant obtenue avec la formule de Magnus-Tetens (Murray, 1997) selon l'équation (26) et de l'humidité relative selon l'équation (27).

$$p_{vs} = 610,78 \times e^{\left( \frac{17,27 \times T}{T + 237,3} \right)} \quad (26)$$

avec  $p_{vs}$  la pression de vapeur saturante [Pa] et  $T$  la température [°C].

$$HR = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (27)$$

Avec  $HR$  l'humidité relative [-],  $p_v$  [Pa] la pression partielle de vapeur et  $p_{vs}$  [Pa] la pression de vapeur saturante.

### 3.3.2.1 Réponse dynamique de la campagne d'humidification

Pour l'analyse du comportement hygrothermique des parois en configuration hivernale, une période d'humidification pour toutes les pièces étudiées a été mise en place entre le 21 et le 25 février 2022<sup>6</sup>. Comme dit précédemment, les humidificateurs ont fonctionné pendant toute la

<sup>6</sup> Au R+1, la pièce 2 n'a pas été étudiée du fait de la présence des équipements d'acquisition sensibles à l'humidité.

période avec un débit de 0,75 l d'eau liquide par heure et la consigne du chauffage a été maintenue à  $20^{\circ}\text{C} \pm 1$ .

Dans la suite, nous présentons donc une comparaison des comportements hygrothermiques entre les différentes solutions constructives étudiées, à savoir, le béton de chanvre banché au R+1 (pour les murs en ossature pan de bois et briques massives) et les plaques préfabriquées au R+2 (pour le mur en ossature pan de bois).

Le positionnement des capteurs est détaillé sur la Figure 96. Pour la nomenclature, « T » correspond aux données de température et « HA » d'humidité absolue. Les données obtenues des thermohygromètres positionnés à l'interface entre le mur porteur et le revêtement en béton de chanvre reçoivent l'indice « interf », et ceux positionnés à l'intérieur du revêtement, à mi-chemin entre la surface du revêtement et l'interface du mur, l'indice « mibio ». Les valeurs obtenues pour l'ambiance présentent l'indice « amb » et celles pour le côté extérieur l'indice « ext ». Finalement, pour les températures de surface intérieure et extérieure, les indices « sint » et « sext », respectivement. Les données de densité de flux sont appelées « flux ».

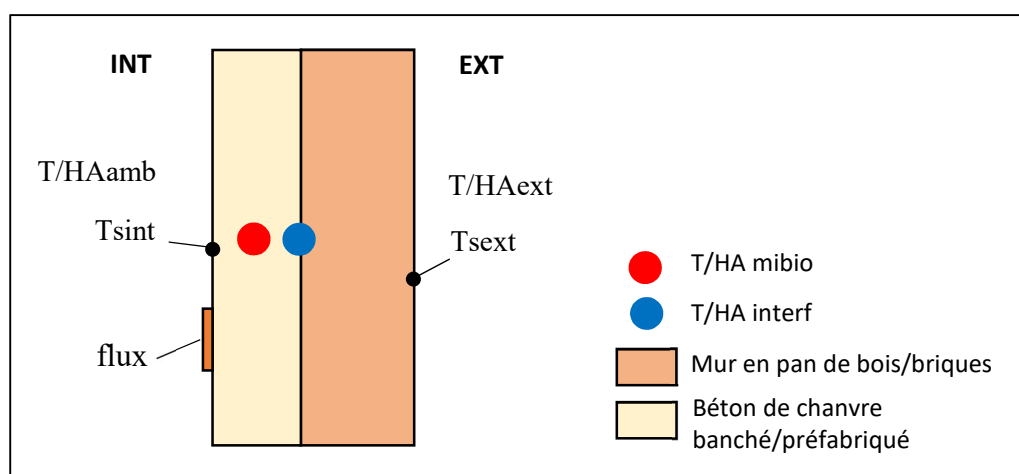


Figure 96 - Positionnement et nomenclature des capteurs au niveaux des parois après rénovation (hors échelle).

Les données de température et d'humidité relative au cœur de l'isolant en béton de chanvre et à l'interface entre l'isolant et le mur porteur sont obtenues uniquement à partir des thermohygromètres Honeywell, et les données de température en surface du revêtement isolant du côté intérieur et en surface de la paroi du côté extérieur uniquement par des thermocouples.

Des tests de perméabilité de l'enveloppe (porte soufflante) ont été menés par Claude (2018) avant et après isolation des façades au R+1. L'auteur a conclu que la présence de l'isolant biosourcé n'a modifié que très légèrement l'étanchéité des pièces pour les bâtiments en pan de bois et en briques, et que le bâtiment est très perméable à l'air, ce qui rend la quantification difficile. D'ailleurs, la ventilation du bâtiment se fait de manière naturelle.

#### a Etage R+1 - Pièce 1 - Mur ossature en pan de bois et revêtement en béton de chanvre banché

La Figure 97 présente le comportement thermique des façades de la pièce 1 au R+1. Les lignes verticales en pointillé rouge représentent le moment exact de la mise en route (On) et de l'arrêt (Off) des humidificateurs. Le comportement hydrique est présenté sur la Figure 98.

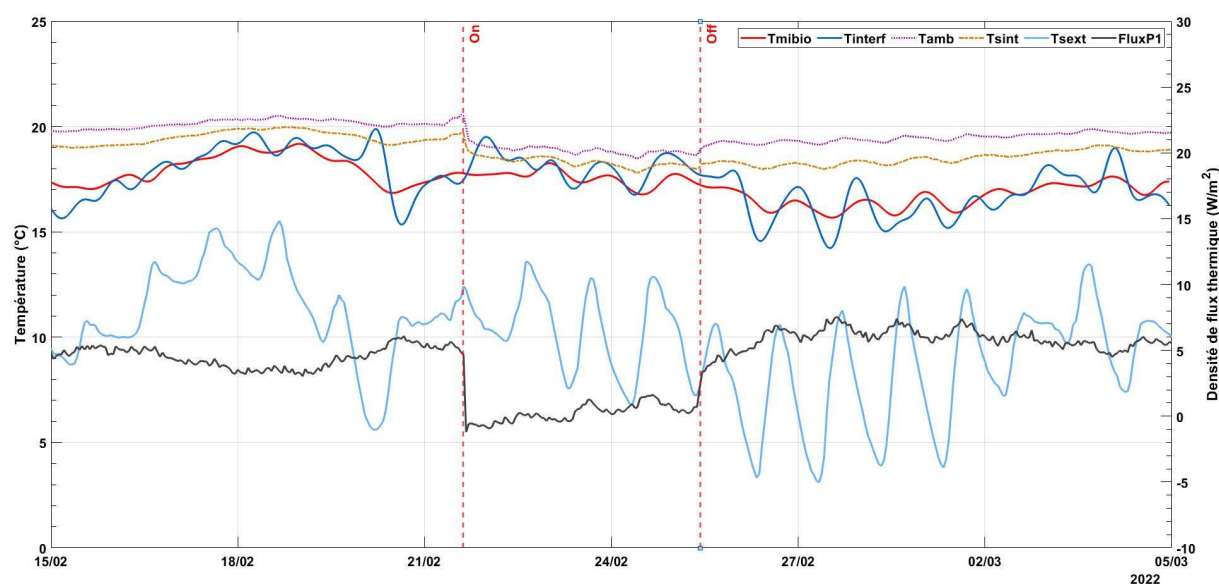


Figure 97 - Comportement thermique R+1 - Pièce 1.

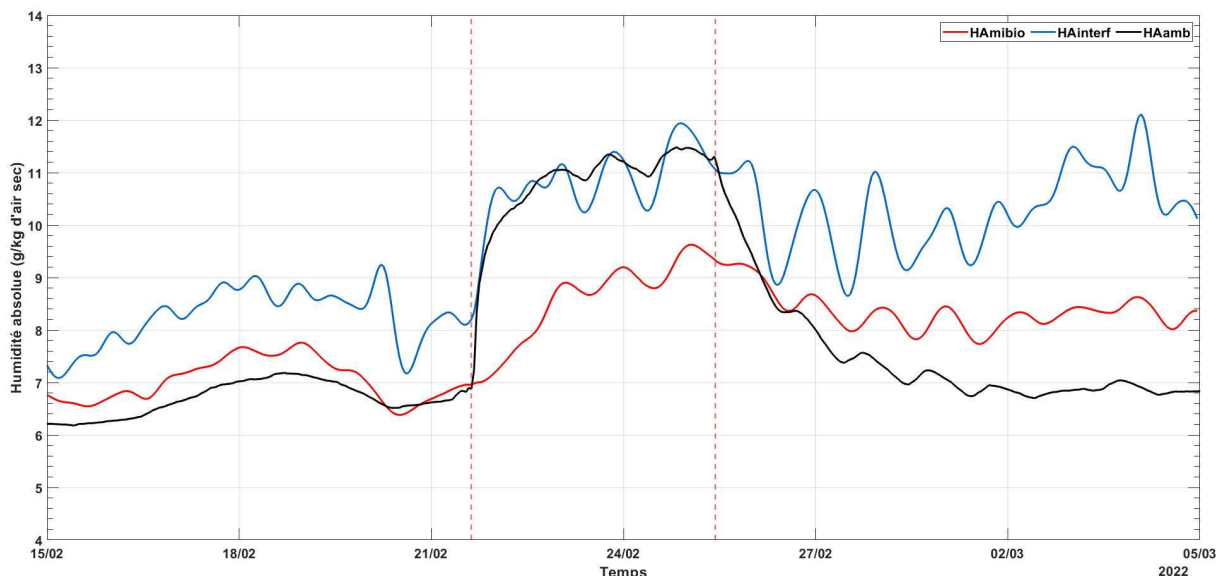


Figure 98 - Comportement hydrique R+1 - Pièce 1.

Au niveau des mesures de température, on observe que les sondes à l'interface entre le revêtement et le mur sont plus influencées par les températures extérieures que par les températures intérieures. La courbe de température à l'interface ( $T_{\text{interf}}$ ) avant humidification suit la même allure que la courbe de température de surface extérieure ( $T_{\text{ext}}$ ) avec un déphasage en temps. Par contre, au milieu du revêtement, les températures ( $T_{\text{mbio}}$ ) sont plutôt constantes et égales à la température de consigne des radiateurs ( $20^{\circ}\text{C} \pm 1$ ) ce qui traduit l'effet attendu d'isolant thermique du revêtement.

Au niveau des humidités absolues, on constate que la sonde positionnée à l'interface entre le mur et le revêtement en béton de chanvre présente des valeurs d'humidité absolue plus importantes que les sondes à l'intérieur du revêtement et même plus importantes que l'humidité de la pièce. Cela peut être expliqué par le fait que cette sonde est plus influencée par les températures externes que par les températures internes, ce qui veut dire que la faible température à l'extérieur maintient un taux d'humidité absolue à l'interface assez élevé.

Pendant la période d'humidification, aucune augmentation de température à l'intérieur/interface de la paroi n'a été observée. Cela montre que les phénomènes de sorption et désorption ne sont pas été présents car les pertes d'humidité au niveau de la pièce sont très importantes pour le bâtiment étudié. La réduction du flux de chaleur observé est liée à la réduction de la température de surface interne due à l'absorption de la chaleur par la vapeur

d'eau (système à enthalpie constante) et à l'augmentation de la convection à la surface intérieure de la paroi entraînée par le ventilateur de l'humidificateur.

### b Etage R+1 - Pièce 3 - Mur ossature brique massive et revêtement en béton de chanvre banché

Pour la pièce 3, en briques massives, nous présentons sur la Figure 99 les mesures thermiques utilisant les données de températures de surface externe de la pièce 1. Cette approximation nous permet d'avoir une idée de l'influence des conditions aux limites extérieures sur les données à l'interface et au milieu du revêtement biosourcé même si, du côté du mur en pan de bois, à cause de l'épaisseur de paroi plus petite et donc des pertes de chaleur plus importantes, les températures de surface à l'extérieur sont plus élevées. Le comportement hydrique est présenté sur la Figure 100.

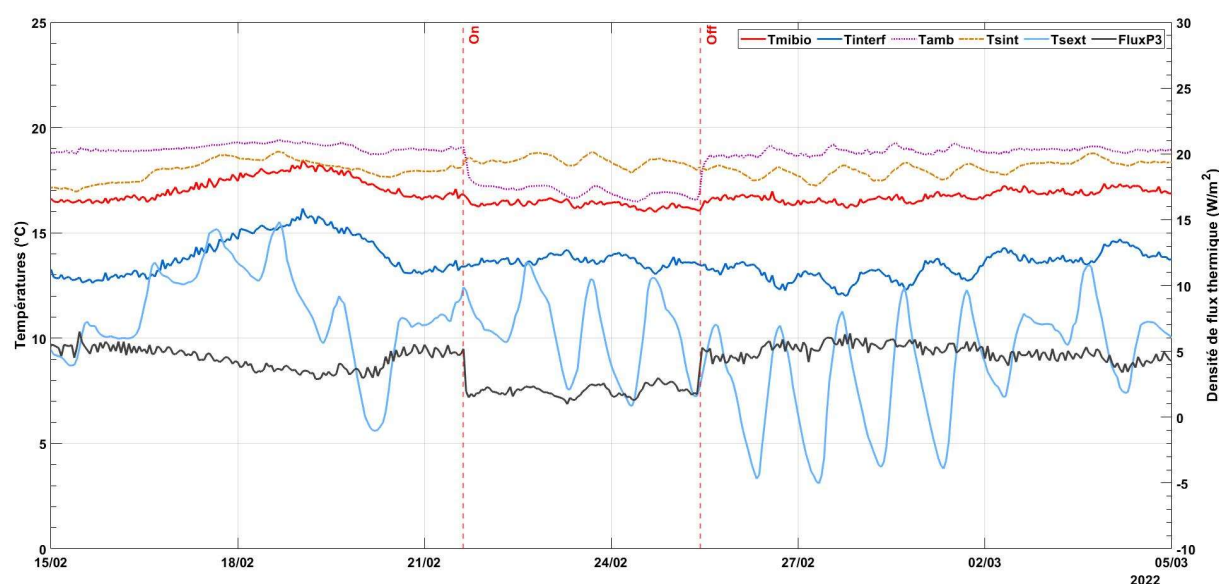


Figure 99 - Comportement thermique R+1 - Pièce 3.

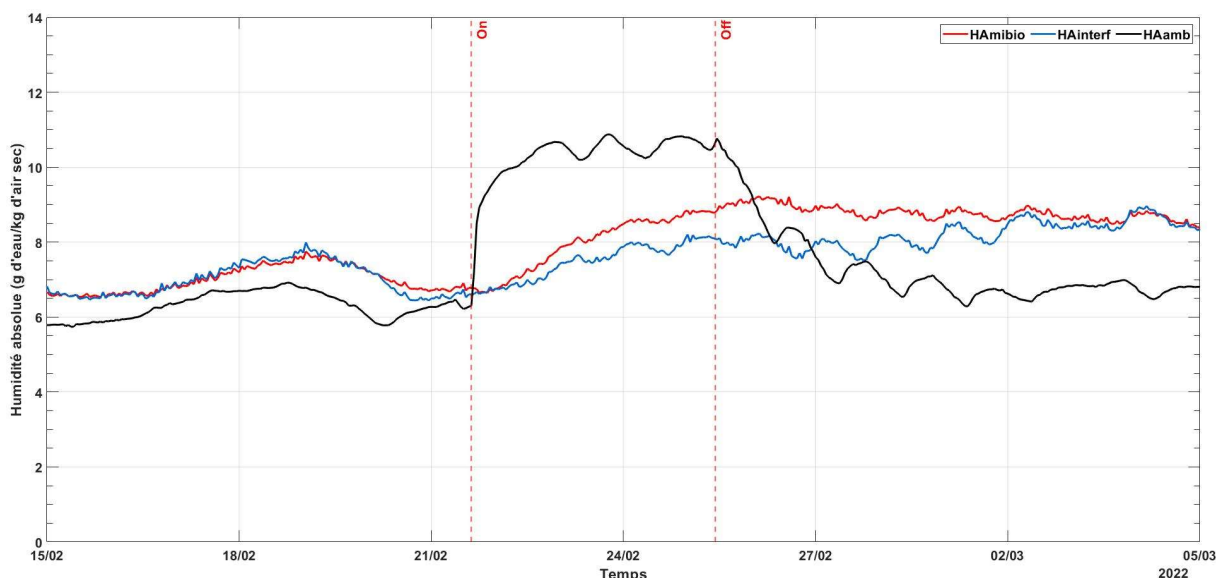


Figure 100 - Comportement hydrique R+1 - Pièce 3.

En comparant les comportements hygrothermiques des pièces 1 et 3 on observe que, au niveau de la pièce, les taux d'humidité à la fin de la période d'humidification sont équivalents, les humidificateurs sont capables de provoquer un incrément de 75% par rapport à l'humidité absolue initiale. Cependant, les humidités au niveau de l'interface (HAinterf) et à l'intérieur du revêtement (HAMibio) se comportent de façon différente.

Pour la pièce 1, les HAinterf sont égales à HAamb et les HAMibio sont inférieures. Pour la pièce 3, les HAamb sont plus importantes que les HAinterf et HAMibio. A l'intérieur du revêtement, les valeurs sont légèrement plus élevées qu'à l'interface. Cela met en évidence l'influence de l'épaisseur du mur pour une constitution en briques, soit massives, soit en remplissage du pan du bois.

En ce que concerne le flux thermique, pendant la période d'humidification, on observe qu'il baisse légèrement. Cela peut être expliqué par la réduction de la température de surface intérieure entraînée par l'humidification, ainsi que par une convection forcée créée par le ventilateur interne de l'humidificateur.

### c Etage R+2 - Mur ossature en pan de bois et revêtement en plaques de béton de chanvre préfabriquées en CHMK et LTCH

Au R+2 nous avons utilisé deux types de fluxmètres, un de surface trouée et un de surface pleine. Dans un premier temps, pour l'analyse du comportement hygrothermique, nous présentons les données de densité de flux obtenues avec les fluxmètres de surface pleine sur les

plaques préfabriquées en CHMK et en LTCH. Une discussion sur les capteurs de surface trouée est présentée dans l'annexe.

La Figure 101 présente le comportement thermique et la Figure 102 le comportement hydrique pour les plaques en CHMK. La Figure 103 présente le comportement thermique et la Figure 104 le comportement hydrique pour les plaques en LTCH.

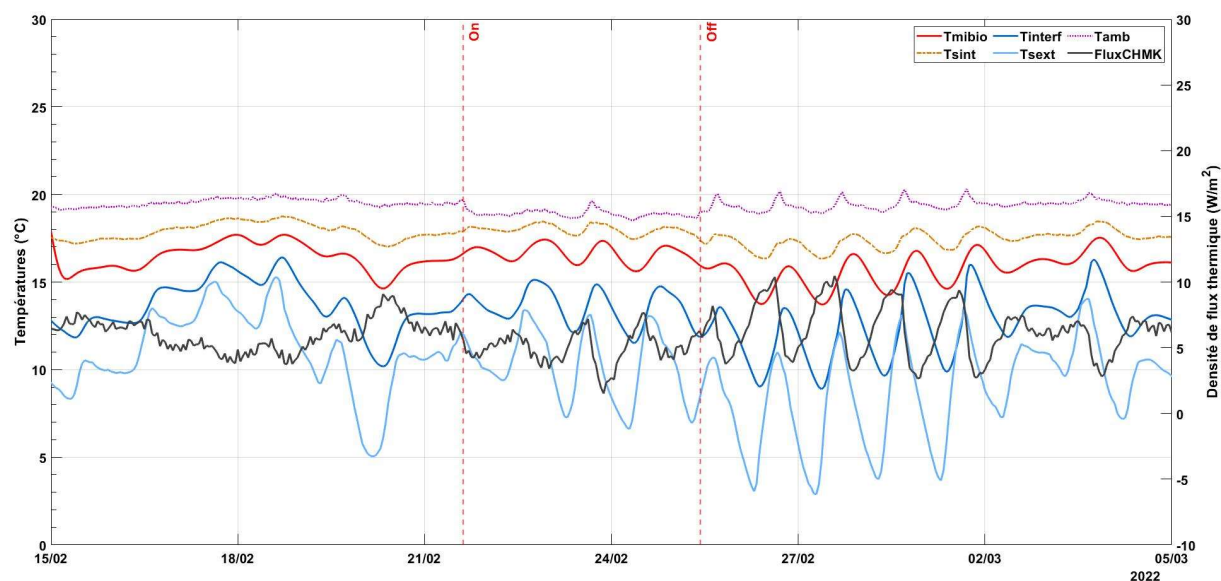


Figure 101 - Comportement thermique R+2 - Béton de chanvre avec liant CHMK.

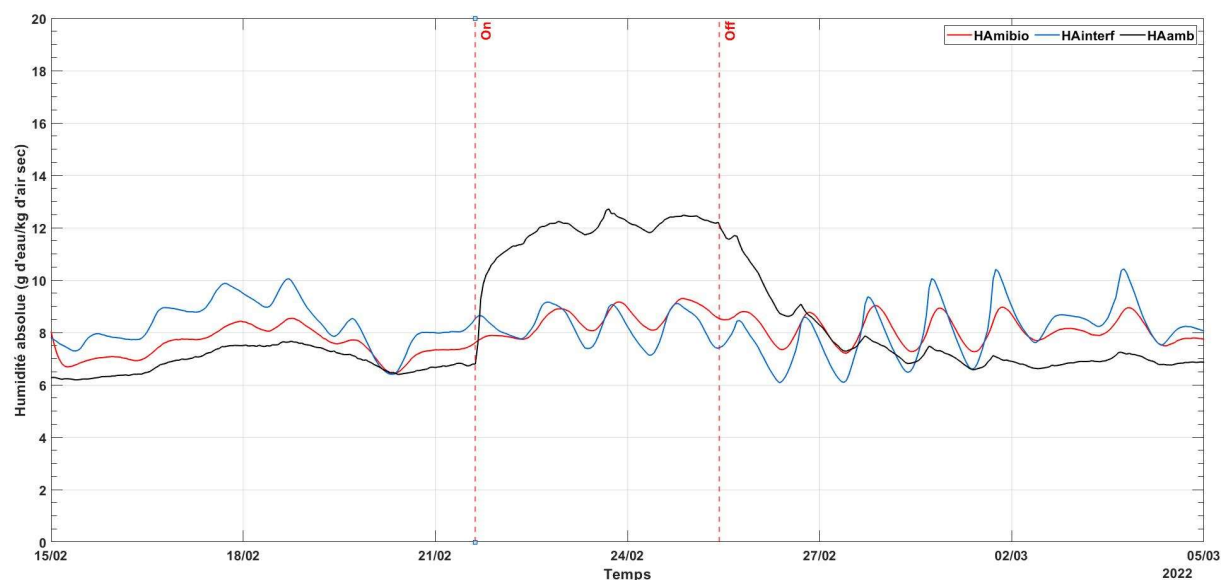


Figure 102 - Comportement hydrique R+2 - Béton de chanvre avec liant CHMK.

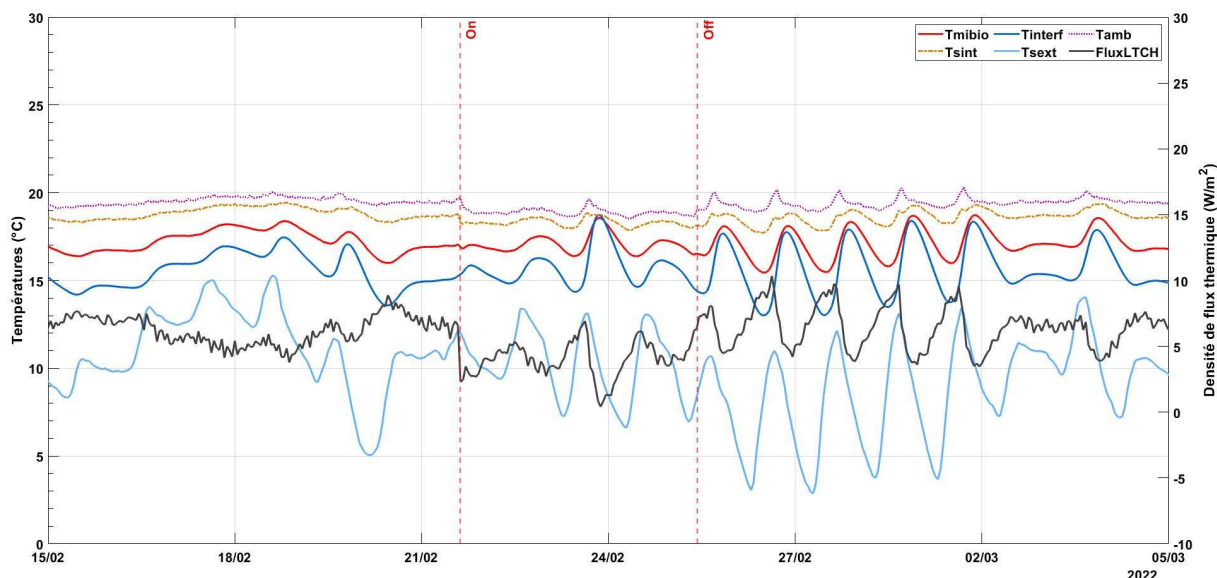


Figure 103 - Comportement thermique R+2 - Béton de chanvre avec liant LTCH.

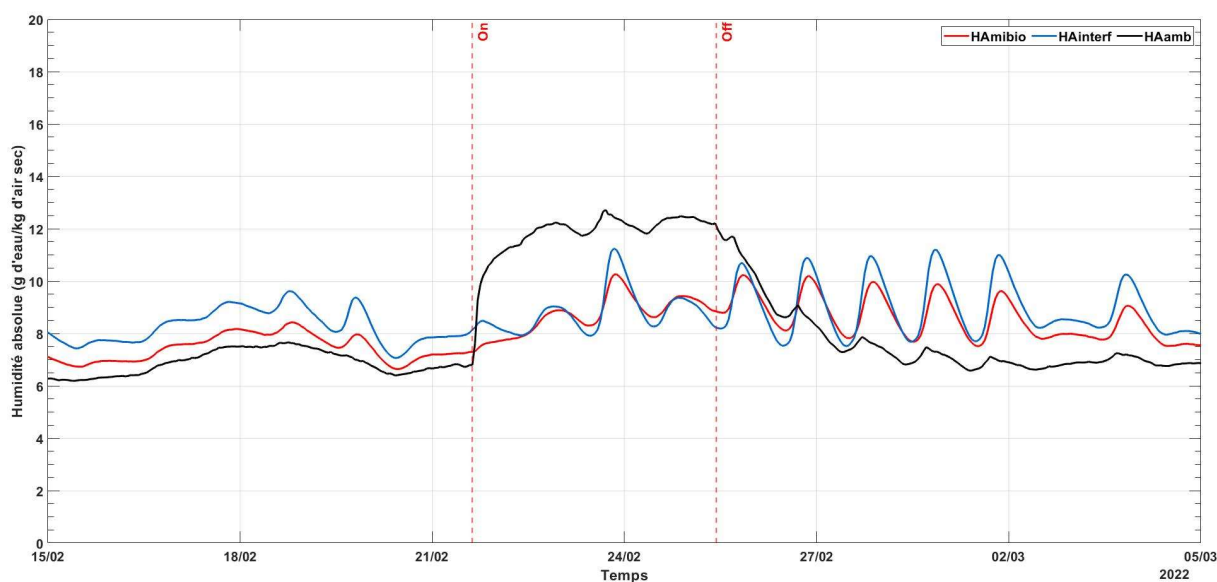


Figure 104 - Comportement hydrique R+2 - Béton de chanvre avec liant LTCH.

Au niveau des mesures de température, comme pour la pièce 1 au R+1 avec la paroi de même typologie constructive, les sondes à l'interface entre le revêtement et le mur sont plus influencées par les températures extérieures que par les températures intérieures pour les deux types de bloc préfabriqué. La température au cœur du revêtement biosourcé (Tmibio) est inférieure pour les blocs en CHMK par rapport aux blocs en LTCH, cela peut être dû à la conductivité thermique plus élevée de ce dernier.

Au niveau des humidités absolues, l'influence de la température externe est encore une fois mise en évidence. Les pics d'humidité maximale à l'interface et au cœur du revêtement correspondent aux pics de température minimale extérieure.

Les mesures de densité de flux semblent être plus influencées par l'humidité au R+2 par rapport au R+1 (pièces 1 et 3). Cependant, les fluxmètres utilisés aux deux étages présentent des typologies (Ahlborn 12x12 cm au R+1 et Captec 10x10 cm au R+2) et des sensibilités (Ahlborn de l'ordre de  $10^{-5}$  et Captec de l'ordre du  $10^{-4}$ ) différentes, ce que complexifie l'analyse. La chute observée aux alentours du 24/02 paraît être due à la chute de la température à l'interface mur/revêtement, comportement qui se répète après la période d'humidification.

Comme indiqué par (Labat *et al.*, 2015), la performance *in-situ* d'une paroi doit être soigneusement analysée car le fort couplage entre les transferts de chaleur et de masse rend difficile la détermination du transfert qui agit le plus.

### 3.3.2.2 Profils en température et en humidité absolue

La Figure 105 illustre et compare les profils d'humidité absolue et de température pour la pièce 1 avant et après humidification. L'écart entre les deux courbes d'humidité absolue correspond donc à la quantité d'eau qui a été absorbée pendant la période d'humidification. Les points rouges représentent les emplacements des sondes.

Les données d'ambiance extérieure sont obtenues à partir de la station météo et sont présentées uniquement pour donner un ordre de grandeur puisque la station est située à environ 400 m des bâtiments étudiés.

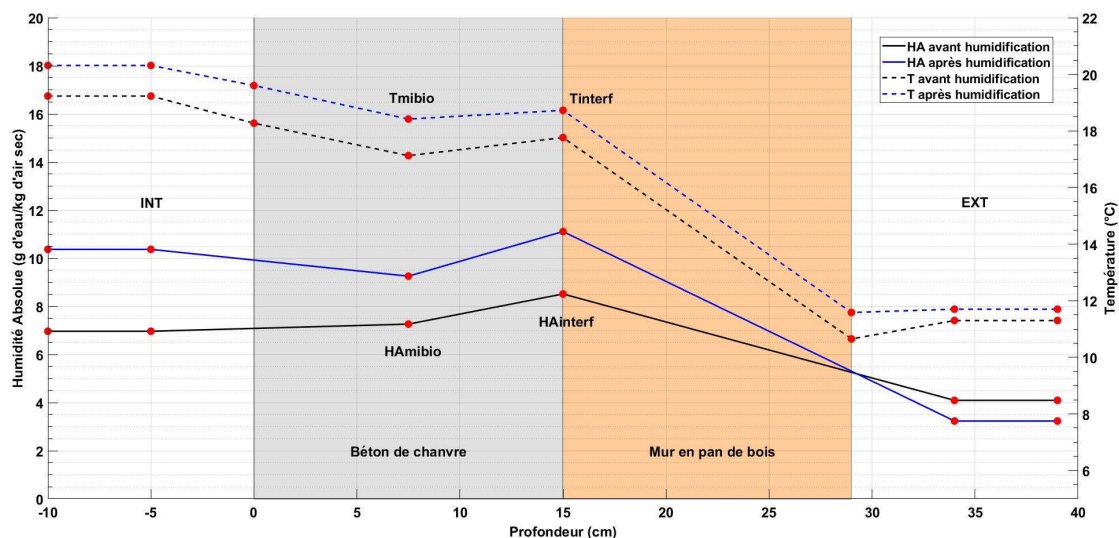


Figure 105 - Profils d'humidité absolue et de température avant et après humidification pour la pièce 1 au R+1.

Pour le choix des données affichées sur les profils, nous avons pris le soin de choisir des instants avec des températures extérieures similaires : pour les données après humidification nous prenons le moment exact où nous avons éteint les humidificateurs et avant humidification nous prenons le moment avec la température ambiante externe le plus proche possible de la température au moment où les humidificateurs ont été désactivés.

Aux instants choisis pour la représentation sur la Figure 105, on observe que les températures de surface externe avant humidification sont très proches des températures ambiantes externes. Après humidification la température de surface externe devient plus importante que la température ambiante externe. Cela peut être dû à une augmentation de la conductivité de la paroi en présence de vapeur d'eau.

Les sondes positionnées dans la pièce 1 sont plus bruitées que celles placées dans les autres pièces et cela semble influencer les données des profils à l'interface et au milieu du matériau biosourcé.

La Figure 106 présente le profil avant et après humidification pour la pièce 3.

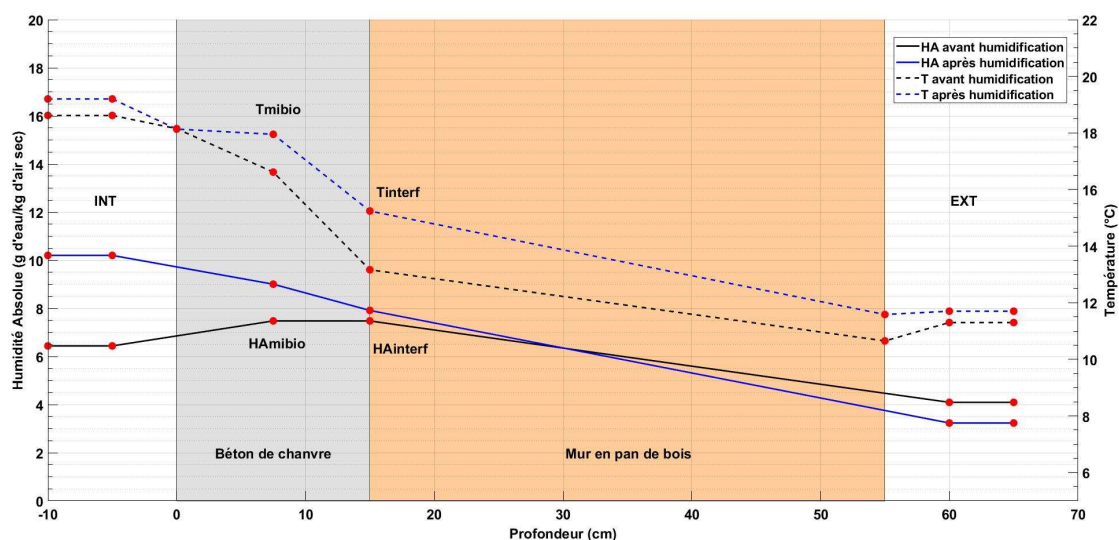


Figure 106 - Profils d'humidité absolue et de température avant et après humidification pour la pièce 3 au R+1.

Les températures de surface externe sont celles du côté pan de bois. Pour la pièce 3, avec un mur en briques massives, la teneur en eau absorbée (comparaison entre les valeurs de la Figure 105 et la Figure 106) est plus petite que pour la pièce 1, avec un mur en pan de bois. Pour les données de température au cœur du revêtement en béton de chanvre, et pour la pièce 1, on observe l'influence plus accentuée de la température externe sur les données, due au pouvoir isolant moins important du mur en pan de bois par rapport au mur en briques.

Pour le R+2, on compare les profils avant et après humidification pour les deux types de liant utilisés. La Figure 107 présente le profil pour le revêtement en CHMK et la Figure 108 pour le revêtement en LTCH.

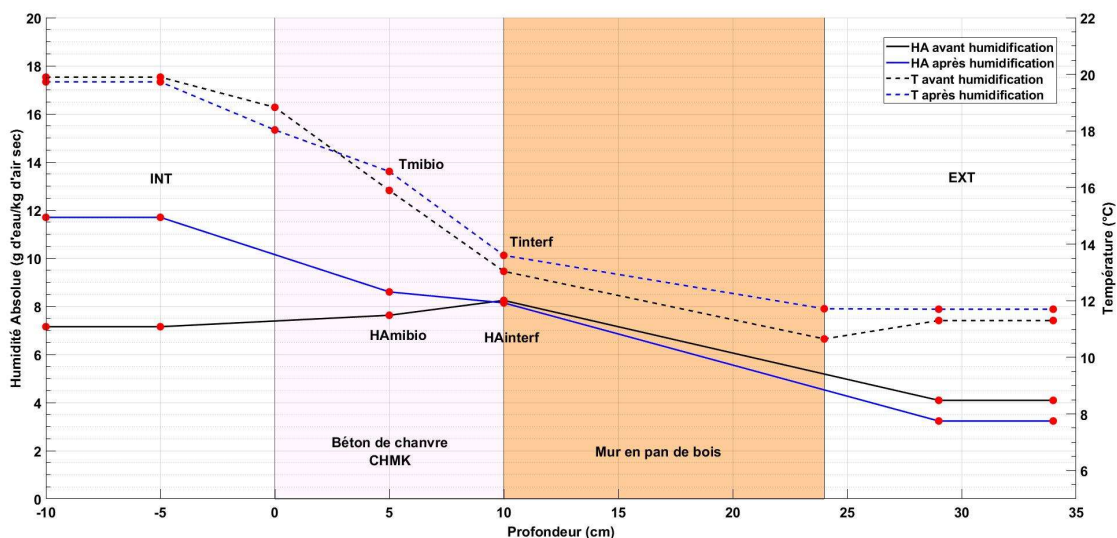


Figure 107 - Profils d'humidité absolue et de température avant et après humidification pour les plaques en CHMK au R+2.

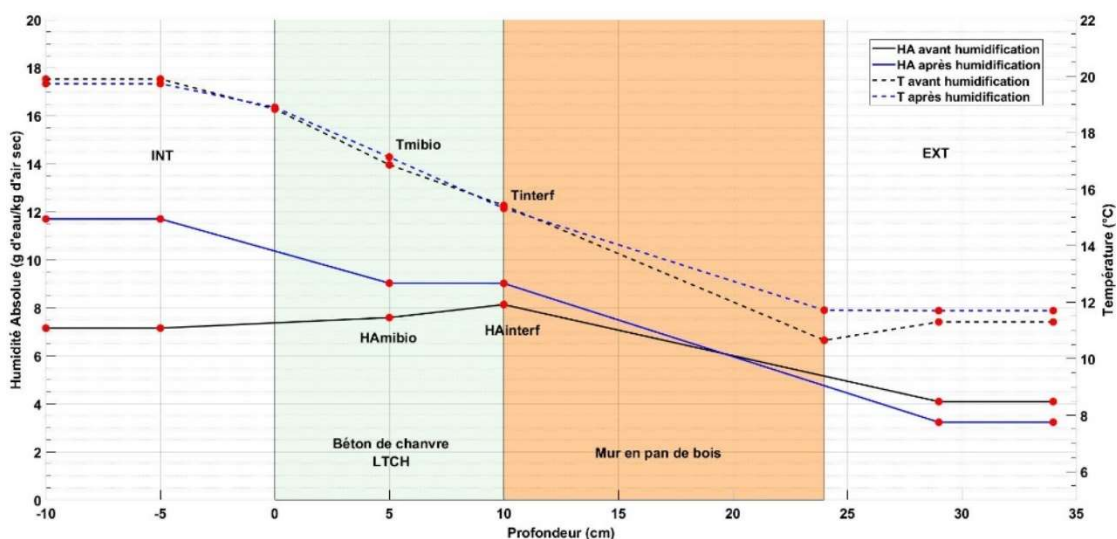


Figure 108 - Profils d'humidité absolue et de température avant et après humidification pour les plaques en LTCH au R+2.

Comme dit précédemment, la faible résistance thermique du mur en pan de bois engendre une forte influence des conditions aux limites extérieures sur les données de température et d'humidité à l'interface et à l'intérieur du béton de chanvre.

De plus, l'écart sur les températures de surface de l'ordre de 1,5°C entre les plaques en CHMK et en LTCH semble peu influencer les transferts d'humidité au sein du revêtement biosourcé. Pour les profils de température, les différences entre les deux types de bloc sont plus prononcées, que ce soit à l'interface ou au cœur du revêtement, les températures sont plus

élevées pour les blocs en LTCH, ce qui est probablement dû à sa conductivité thermique plus importante.

### 3.3.2.3 Inertie hydrique

Comme montré précédemment, l'inertie hydrique est une propriété connue des matériaux de construction, dont le principe repose sur des mesures de l'évolution de la masse lorsque son environnement voisin est soumis à une variation cyclique journalière d'humidité relative. Les mesures sont normalement réalisées sur des éprouvettes de matériaux en conditions contrôlées de laboratoire (enceintes climatiques ou solutions salines) comme discuté dans la partie 2.2.3.3. Des investigations expérimentales supplémentaires *in-situ* à l'échelle de la paroi sont proposées dans cette partie.

Comme indiqué par (Labat *et al.*, 2015), les bilans thermique et massique à l'échelle du bâtiment sont fortement influencés par d'autres phénomènes, qui ne peuvent pas être déterminés avec un niveau de confiance élevé. Cependant, nous proposons un indicateur, similaire au déphasage thermique, pour quantifier l'inertie hydrique des parois *in-situ*. Cet indicateur, nommé « déphasage hydrique » correspond au temps nécessaire à l'humidité relative, après le cycle d'humidification appliqué, pour revenir à son état initial.

Nous choisissons de présenter les résultats en fonction de l'humidité relative car la propriété de tampon hydrique (MBV) des matériaux est décrite selon ce paramètre. De plus, les humidités à l'interface entre le mur et revêtement étant plus influencées par les températures extérieures, le déphasage hydrique est évalué selon les variations au cœur du revêtement biosourcé (HRmibio). On considère que le flux d'humidité se produit seulement en direction de la pièce car les températures extérieures étant faibles pour la période analysée, l'humidité à l'interface se maintient élevée et fonctionne comme une barrière au flux d'humidité vers l'extérieur.

Il est important de rappeler que pour le R+1, seulement la façade ouest a été rénovée et pour le R+2 environ un tiers de la surface totale de la façade ouest. Ainsi, le déphasage hydrique calculé au niveau de la pièce n'est qu'une valeur approchée.

Dans la suite nous présentons le déphasage hydrique pour chaque pièce étudiée. L'effet de tampon hydrique de la paroi est observé pour toutes les pièces. De façon globale, les humidités relatives au niveau de la pièce chutent beaucoup plus rapidement que celles au niveau de la paroi.

a Etage R+1 - Pièce 1 - Mur ossature en pan de bois et revêtement en béton de chanvre banché

La Figure 109 présente l'évolution des températures et humidités relatives au niveau de la pièce 1.

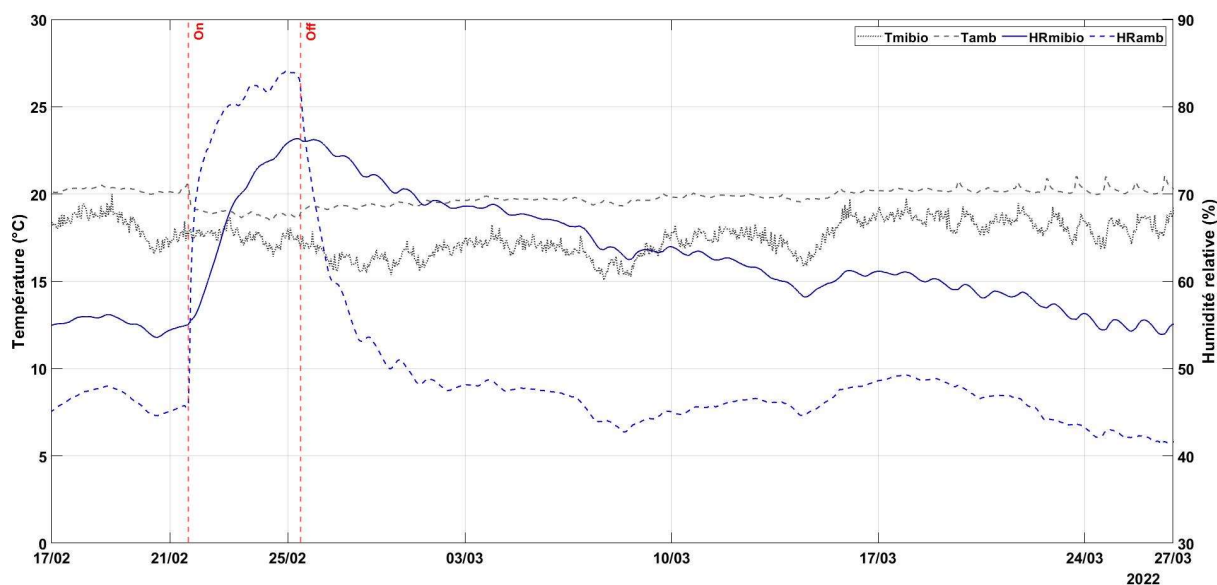


Figure 109 - Déphasage hydrique de la paroi en béton de chanvre banché au R+1 - Pièce 1.

La capacité de stockage de la paroi est attestée. On observe que l'humidité relative au niveau de la pièce baisse beaucoup plus rapidement que celle au niveau de la paroi.

### b Etage R+1 - Pièce 3 - Mur ossature brique massive et revêtement en béton de chanvre banché

La Figure 110 présente l'évolution des températures et humidités relatives au niveau de la pièce 3.

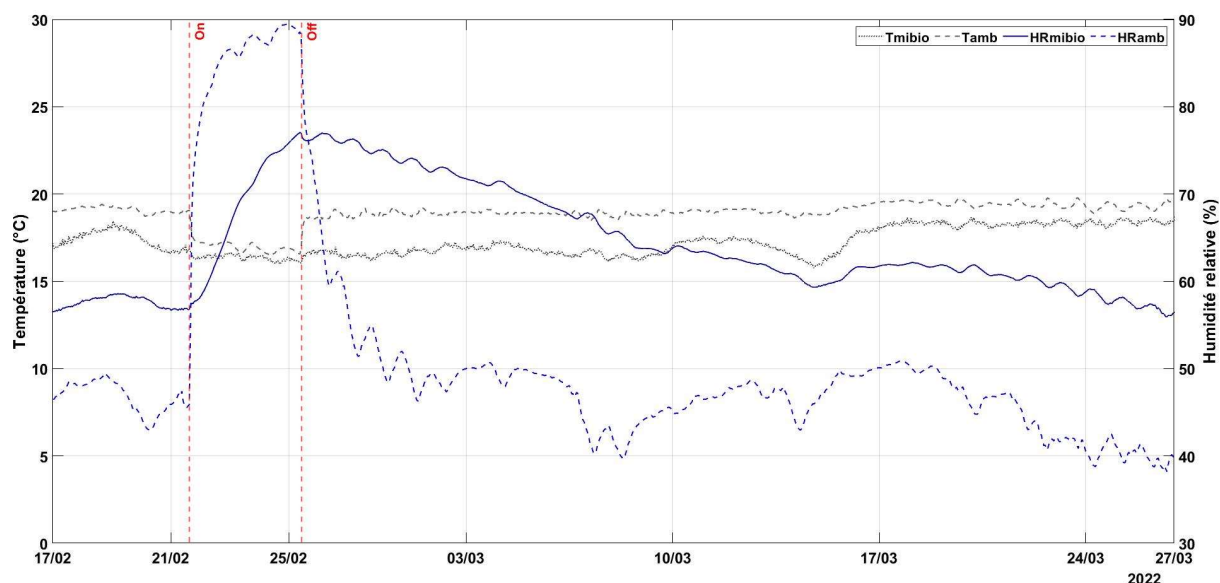


Figure 110 - Déphasage hydrique de la paroi en béton de chanvre banché au R+1 - Pièce 3.

En comparant le comportement des pièces 1 et 3, on observe que les deux pièces présentent un comportement hydrique similaire. La libération d'humidité depuis l'intérieur du revêtement en direction de la pièce est lente, la stabilisation est atteinte plusieurs jours après la fin de la période d'humidification.

**c Etage R+2 - Mur ossature en pan de bois et revêtement en plaques de béton de chanvre préfabriquées en CHMK et LTCH**

La Figure 111 présente l'évolution des températures et humidités relatives au R+2 pour le panneau en blocs de CHMK et la Figure 112 pour le panneau en blocs de LTCH.

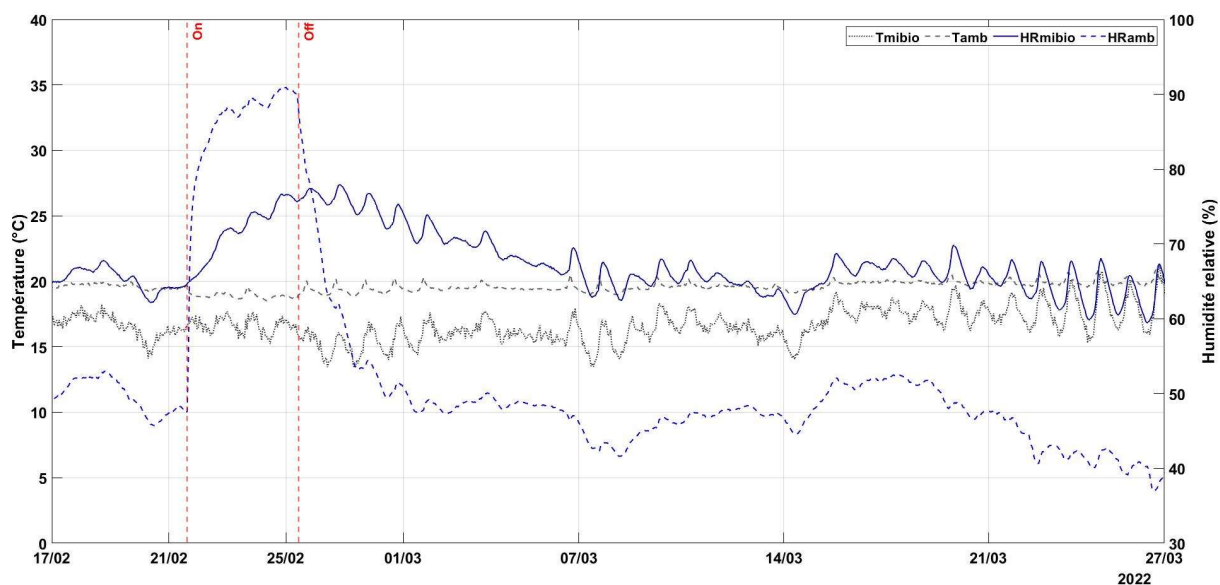


Figure 111 - Déphasage hydrique de la paroi en béton de chanvre banché au R+2 - CHMK.

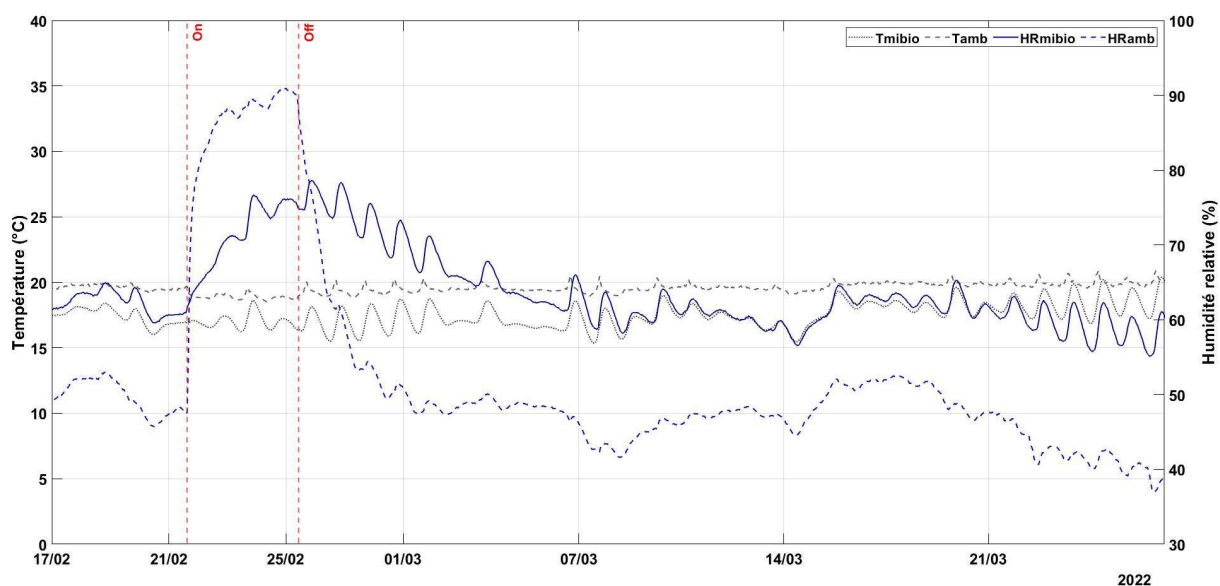


Figure 112 - Déphasage hydrique de la paroi en béton de chanvre banché au R+2 - LTCH.

On observe qu'au R+2 les deux types de bloc préfabriqué présentent un comportement hydrique similaire. La stabilisation de l'humidité relative au niveau de la pièce et de la paroi est beaucoup plus rapide par rapport au R+1.

La Figure 113 résume les déphasages hydriques par paroi, basée sur la sonde au milieu du revêtement en béton de chanvre (mibio) et pour la pièce, basée sur les données des boîtiers KIMOs.

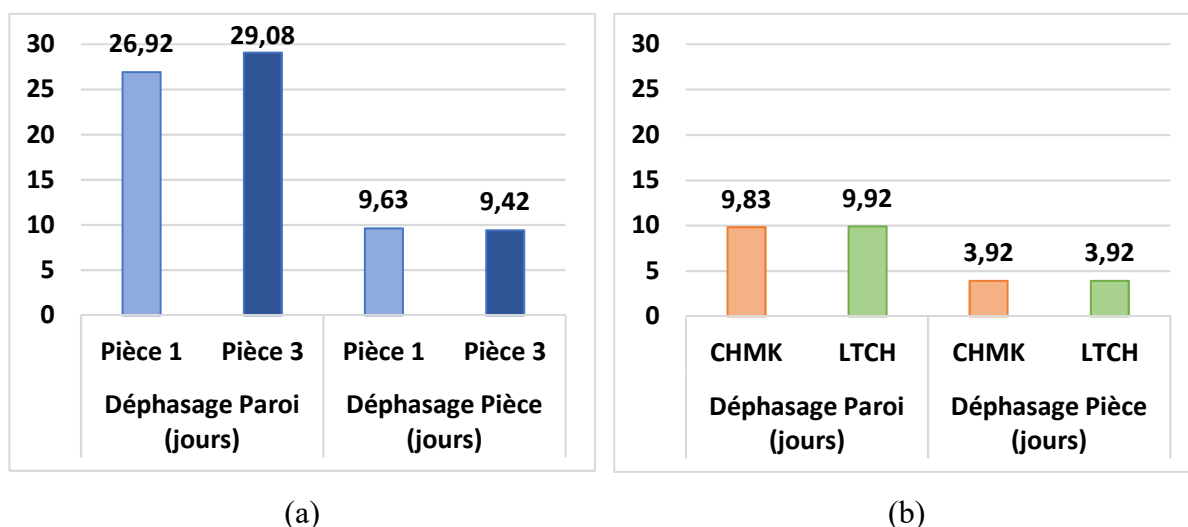


Figure 113 - Déphasage hydrique (a) au R+1, selon la pièce étudiée et (b) au R+2 selon le type de bloc étudié.

On observe que le béton de chanvre appliqué au R+1 présente des inerties hydriques plus importantes que celles des plaques préfabriquées appliquées au R+2. Cependant, les surfaces étudiées au R+1 sont beaucoup plus grandes que celles au R+2, ce qui fait que les valeurs ne sont pas réellement comparables entre elles. Une comparaison entre les deux pièces étudiées au R+1 et entre les deux types de liant reste toujours possible. On constate que, au R+1, la typologie constructive du mur n'influence pas l'inertie hydrique pour la configuration étudiée. Une étude pendant une période d'été est recommandée pour pouvoir analyser cette influence. Au R+2, les deux types de plaques étudiées présentent un comportement *in-situ* similaire, ce qui était attendu puisque les deux sont classés comme « excellents » régulateurs hydriques (cf. partie 2.2.3.3a).

### 3.4 Conclusions

Le comportement hygrothermique *in-situ* des différentes solutions de rénovation analysées dans cette étude (béton de chanvre banché, plaques préfabriquées et polystyrène) a été examiné et comparé. Une forte influence des conditions aux limites extérieures sur les données de température et d'humidité à l'interface et à l'intérieur du revêtement biosourcé a été constatée. Les analyses des différents couplages hygrothermiques ont mis en évidence le fort pouvoir de régulation de l'humidité relative intérieure et donc l'intérêt de l'utilisation des matériaux biosourcés en rénovation du bâti ancien.

Notre travail a permis de comparer les résultats de 3 méthodes de détermination de U (calcul théorique, HFM et TBM) pour deux types de parois anciennes (pan de bois et briques massives) et de conclure que la méthode fluxmétrique semble être la plus adaptée. L'analyse menée au R+1 montre que la mise en œuvre d'un matériau biosourcé par banchage à l'intérieur se traduit par une amélioration de U de 80% pour la paroi en pan de bois et 65% pour la paroi en briques massives par rapport à la paroi nue. L'analyse menée au R+2 montre que la mise en œuvre des plaques préfabriquées se traduit par une augmentation de U d'environ 30% pour la paroi en pan de bois par rapport à une isolation en polystyrène.

Il faut garder à l'esprit l'influence de l'état hydrique du revêtement biosourcé sur les propriétés thermiques analysées. La mise en place des plaques préfabriquées avec mortier colle entraîne une redistribution d'eau dans le matériau qui peut influencer sa conductivité thermique.

Notre travail a aussi porté sur les aspects de dynamique thermique. La mise en œuvre de matériau biosourcé se traduit par une augmentation d'environ 300% du déphasage, passant de 0,05h à 8,33h, et une réduction de 90% de l'amortissement (ce qui correspond à une amélioration des propriétés de confort).

L'étude hydrique a confirmé le comportement attendu des parois biosourcées, avec une inertie hydrique moyenne mesurée de 30 jours au R+1 (pans de bois et briques) et d'environ 10 jours au R+2 pour les deux types de plaques utilisées et pour une période d'humidification de 5 jours.

Cette partie met aussi en évidence la complexité d'interpréter les résultats du monitoring *in-situ*. La quantité de paramètres impliqués et non contrôlés à différents niveaux (matériaux et météorologique) rendent cette tâche encore plus difficile. Pour mieux comprendre ce comportement en présence des différents types de revêtement et en régime transitoire sur

différentes conditions aux limites, nous avons choisi de simuler les transferts hygrothermiques au sein de la paroi. Cette discussion est présentée dans le prochain chapitre.



## CHAPITRE 4 MODELISATIONS NUMERIQUES ET SIMULATIONS

Une rénovation appropriée et efficace nécessite une compréhension du comportement des bâtiments existants et des matériaux de construction impliqués. Les mesures de rénovation sont normalement appuyées sur les « déterminations d'état » d'un bâtiment, une procédure multidisciplinaire basée sur la réflexion holistique des différents facteurs impliqués et aussi sur des mesures *in-situ* (Arfvidsson *et al.*, 2017). Cependant, il arrive parfois que l'impact d'une mesure de rénovation ne puisse pas être déterminée par des mesures *in-situ* mais nécessite l'utilisation d'autres méthodes, telles que des simulations. Pour que les simulations décrivent avec précision les situations avant ou après rénovation d'un bâtiment, des données d'entrée précises et des modèles validés sont nécessaires (Abdul Hamid et Wallentén, 2017).

Si le but d'une simulation est de déterminer les risques associés avec l'application d'une mesure de rénovation, la simulation doit être basée sur un scénario d'utilisation. Toutefois, afin d'obtenir des résultats applicables de manière plus réaliste, la modélisation de la mesure de rénovation doit être basée sur une conception applicable aussi de manière réaliste, et les facteurs qui affectent le résultat doivent être sélectionnés de manière aussi réaliste que possible. Une analyse approfondie des données de surveillance *in-situ* peut fournir des indications sur les facteurs (conditions aux limites) à sélectionner (Abdul Hamid et Wallentén, 2017).

La confection d'un modèle capable de prévoir le comportement d'un bâtiment ancien et de ses sous-parties s'avère donc une tâche complexe. Plusieurs auteurs soulignent le manque de données sur le comportement des bâtiments anciens (ventilation naturelle), l'hétérogénéité de la paroi (utilisation de différents matériaux simultanément), la difficulté de la mise en place des systèmes d'acquisition de données, les particularités du climat en milieu urbain, ou la détermination « capricieuse » des facteurs affectant les résultats qui mène souvent à un écart entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées (Labat *et al.*, 2016 ; Claude, 2018).

De plus, l'utilisation de matériaux biosourcés semble aggraver la problématique. Cela est dû à leur forte hygroscopicité et à la complexité de la physique des transferts de l'eau (vapeur et liquide) en leur sein (Samri, 2008). Tout ceci peut expliquer la faible quantité de travail sur

l'écornovation des murs anciens en alliant les analyses expérimentales *in-situ* et numériques. En France, le projet « Modélisation du comportement thermique du bâtiment ancien avant 1948 » (BATAN) et le projet « Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants » (HYGROBAT), au niveau européen, le projet « Internal Insulation in Historic Buildings » (RIBuild), ou encore, au Royaume-Uni le Sustainable Traditional Buildings Alliance (STBA), en sont quelques exemples.

Afin de surmonter ces difficultés, certains auteurs préfèrent caractériser le comportement des matériaux biosourcés en laboratoire, avec des chambres climatiques, et utiliser ces données pour alimenter et valider les modèles, comme (Rahim *et al.*, 2017 ; Seng, 2018 ; Busser *et al.*, 2019) par exemple. Dans notre cas, on considère que le comportement singulier des bâtiments anciens ne peut pas être reproduit correctement en conditions contrôlées de laboratoire. Nous avons ainsi décidé de travailler avec les données obtenues *in-situ* (cf. Chapitre 3).

Pour créer un modèle qui puisse être utilisé pour l'évaluation des risques liés à la rénovation des bâtiments anciens de Cahors, une approche multi-échelle est présentée. Nous étudions les deux façades rénovées par (Claude, 2018) au R+1 et la façade rénovée avec le béton de chanvre préfabriqué présenté au Chapitre 2 au R+2. Les résultats des simulations pour la configuration en polystyrène et plâtre (avant rénovation) ont été présentés par (Proquez, 2021).

Les conditions aux limites à l'intérieur ont été obtenues à l'aide du banc expérimental *in-situ* mis en place dans le cadre de cette thèse. Celles à l'extérieur sont obtenues soit directement à partir des données de la station météorologique, soit selon une méthodologie développée par (Claude, 2018) permettant de prendre en compte la morphologie urbaine et utilisant les données de la station météorologique dans le logiciel EnergyPlus®.

Au niveau des matériaux, les parois et le béton de chanvre banché appliqué au R+1 ont été caractérisés par (Claude, 2018) et les propriétés des bétons de chanvre préfabriqués sont celles obtenues à partir de la caractérisation menée au Chapitre 2.

La Figure 114 montre un aperçu global des paramètres utilisés pour alimenter le modèle et leur origine. Chaque paramètre sera détaillé dans les parties suivantes.

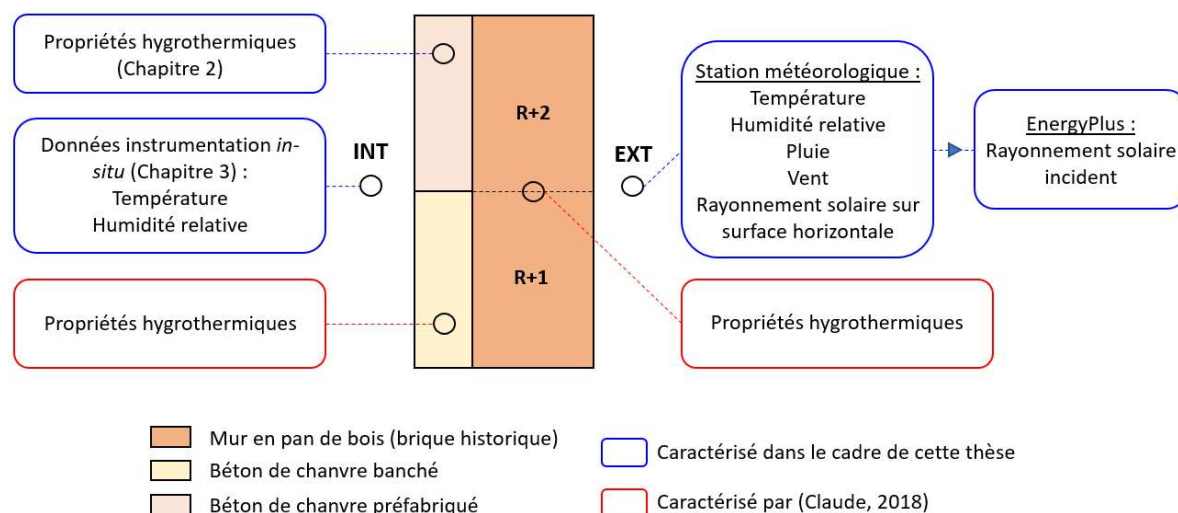


Figure 114 - Aperçu global des paramètres d'entrée du modèle développé.

La validation du modèle est menée en comparant l'approche numérique à l'approche expérimentale *in-situ* selon chaque configuration étudiée. Même si les modèles obtenus présentent une bonne corrélation avec les données expérimentales, comme on le verra ci-après, ils ne sont pas exempts d'amélioration. Dans ce chapitre nous présentons l'outil numérique choisi, l'implémentation du modèle en détaillant chaque paramètre d'entrée et des possibilités d'amélioration.

#### 4.1 Outil numérique : DELPHIN 6.1

Comme expliqué précédemment, l'évaluation des transferts couplés se fait grâce à un système de trois équations différentielles aux dérivées partielles (EDP) appliquées aux VER : une pour le transfert de chaleur, une pour le transfert d'humidité et une pour le transport d'air. Comme les coefficients de ces trois EDP dépendent de la température et de la teneur en eau, résoudre analytiquement ce problème est extrêmement complexe et une approche numérique basée sur les volumes de contrôle ou les éléments finis est la seule solution de résolution (Hens, 2002).

Nous avons choisi de travailler avec le logiciel Delphin à interface graphique et validé plusieurs fois à l'aide de benchmarks et à travers différents projets de recherches alliant des mesures *in-situ* et des simulations hygrothermiques, les détails des validations sont présentés dans (Sontag *et al.*, 2013). Il a été développé depuis la thèse de (Nicolai, 2007) démarrée en 2004 à l'Université de Technologie de Dresden. Contrairement aux autres logiciels de modélisation du transport de chaleur et d'humidité fonctionnant uniquement avec la température et l'humidité

relative, Delphin inclut également la pression capillaire comme l'une des variables d'état de base, ce qui permet de déterminer le transport de l'humidité liquide avec une précision et une fiabilité beaucoup plus élevée. Pour les systèmes d'isolation intérieure, c'est un facteur crucial car l'humidité liquide est presque toujours la cause fondamentale des défauts et des défaillances (Proquez, 2021).

L'avantage d'inclure ce potentiel est de disposer d'une courbe pression/degré de saturation relativement monotone sur tous les états hydriques et notamment du passage du domaine hygroscopique au domaine capillaire (Aouba, 2015).

La mise en œuvre du code nécessite la connaissance d'un certain nombre de grandeurs, telles que : les propriétés physiques et hygrothermiques des matériaux, les fonctions décrivant la variation de ces propriétés selon le changement des états hygrothermiques du matériau et les conditions aux limites à l'intérieur et à l'extérieur de la paroi. Les données de conditions climatiques sont utilisées en conditions aux limites du problème. Celles-ci peuvent être définies de plusieurs manières : condition de Dirichlet, Neumann ou Cauchy pour les conditions aux limites de l'équation d'équilibre du flux de chaleur, et condition de Cauchy pour l'équation d'équilibre de l'humidité.

Les grandeurs possibles à mettre en place pour les simulations avec le logiciel Delphin sont présentées dans la Figure 115.

| Propriétés matériaux                                                        | Fonctions matériaux | Données climatiques                      | Conditions aux limites |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------|------------------------|
| Masse volumique $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]                                 | Transport thermique | Température et humidité relative externe | Flux de chaleur        |
| Capacité thermique $c_p$ [J/kg.K]                                           | Stockage thermique  | Température et humidité relative interne | Flux de vapeur         |
| Porosité ouverte $\theta_{por}$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]           | Stockage d'humidité | Rayonnement solaire                      | Rayonnement solaire    |
| Teneur en eau à saturation $\theta_{eff}$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | Transport de vapeur | Pluie battante                           | Pluie battante         |
| Teneur en eau capillaire $\theta_{cap}$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]   | Transport liquide   |                                          |                        |
| Conductivité thermique $\lambda$ [W/m.K]                                    | Transport d'air     |                                          |                        |
| Coefficient d'absorption capillaire $A_{cap}$ [kg/(m <sup>2</sup> .√s)]     |                     |                                          |                        |
| Perméabilité vapeur $\mu$ [-]                                               |                     |                                          |                        |

Figure 115 - Grandeurs à mettre en place pour les simulations avec le logiciel Delphin.

Dans les sous-parties suivantes nous présentons les équations de bilan utilisées dans le logiciel ainsi que chacune de ces grandeurs appliquées au modèle développé.

#### 4.1.1 Equations de bilan

La modélisation des transferts est basée sur les équations de conservation de la masse d'humidité, de la masse d'air et de l'énergie. La méthode de calcul repose sur une semi-discrétisation dans l'espace, basée sur la méthode des volumes de contrôle, suivie d'une intégration dans le temps. Le pas de temps est variable. Ces équations sont composées à gauche de l'égalité d'un terme représentant le stockage d'énergie et à droite d'un terme caractérisant les transferts dans l'espace.

La conservation de la chaleur est exprimée dans le logiciel Delphin selon l'équation (28).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = - \frac{\partial}{\partial x} [j_{diff}^Q + u_l \times j_{conv}^{m_l} + u_g \times j_{conv}^{m_g} + h_v \times j_{diff}^{m_v}] \quad (28)$$

avec  $\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U$  ( $W.m^{-3}$ ) l'évolution temporelle de la quantité de chaleur dans le volume élémentaire représentatif,  $j_{diff}^Q$  ( $W.m^{-2}.s^{-1}$ ) le terme de diffusion de la chaleur comme exprimé par l'équation (8),  $h_v \times j_{diff}^{m_v}$  l'apport ou le retrait de chaleur latente due à la condensation ou à l'évaporation d'eau comme présenté dans l'équation (9) et  $u_l \times j_{conv}^{m_l}$  et  $u_g \times j_{conv}^{m_g}$  la chaleur sensible due respectivement aux transferts d'eau liquide et sous forme de vapeur comme montré dans l'équation (10).

La formulation de la conservation de la masse dans le logiciel Delphin est exprimée comme décrit sur l'équation (29).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_w+v+i} = - \frac{\partial}{\partial x} [j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v}] + \sigma_{REV}^{m_w+v+i} \quad (29)$$

avec  $\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_w+v+i}$  ( $kg.m^{-3}$ ) l'évolution temporelle de la masse d'eau liquide, sous forme de vapeur et de glace dans le volume élémentaire représentatif,  $j_{conv}^{m_w}$  et  $j_{diff}^{m_v}$  ( $kg.m^{-2}.s$ ) les termes décrivant les transferts d'eau liquide et de vapeur dans le VER détaillés dans les équations (30) et (31) ci-après,  $\sigma_{REV}^{m_w+v+i}$  ( $kg.m^{-3}$ ) un terme source,  $j_{conv}^{m_v}$  ( $kg.m^{-2}.s$ ) décrit le transfert convectif de vapeur dans le cas où les transferts d'air dans le matériau sont pris en compte.

Les transferts d'eau liquide sont exprimés dans Delphin selon l'équation (4), avec un terme supplémentaire caractérisant les effets de pesanteur comme décrit sur l'équation (30).

$$j_{\text{conv}}^{\text{m}_w} = -K_w(w) \left[ \frac{\partial p_c}{\partial x} + \rho_w g \right] \quad (30)$$

avec  $j_{\text{conv}}^{\text{m}_w}$  (kg.m<sup>-2</sup>.s) le terme décrivant le transfert d'eau liquide dans le VER détaillé dans l'équation (30),  $K_w(w)$  (kg.Pa<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>) la conductivité liquide exprimée en fonction de la teneur en eau,  $p_c$  (Pa) la pression capillaire et  $\rho_w g$  un terme supplémentaire caractérisant les effets de la pesanteur.

Cependant, il est à noter que le calcul des transferts d'eau liquide peut également être pris en compte par Delphin en fonction de la diffusivité liquide avec la teneur en eau comme potentiel moteur.

Les transferts de vapeur sont détaillés par Delphin à partir de l'équation (3) avec l'ajout d'une fonction  $f(\theta_g)$  tenant compte de l'état de saturation des pores comme montré sur l'équation (31).

$$j_{\text{diff}}^{\text{m}_v} = - \frac{D_{v,\text{air}}(T)}{\mu * R_v * T} \times f(\theta_g) \times \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (31)$$

avec  $j_{\text{diff}}^{\text{m}_v}$  (kg.m<sup>-2</sup>.s) le terme décrivant le transfert de vapeur dans le VER détaillé dans (31),  $D_{v,\text{air}}(T)$  (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) le coefficient de diffusion en fonction de la température,  $\mu$  (-) la résistance à la vapeur d'eau et  $p_v$  (Pa) la pression de vapeur.

### 4.1.2 Données matériaux

L'éditeur de matériaux du logiciel Delphin fonctionne à partir de deux types de données : les caractéristiques de base qui se présentent sous la forme d'une valeur unique et d'une unité, qui seront présentées ci-après, et des fonctions, qui seront présentées dans la suite.

Comme dit précédemment, les caractéristiques des parois (brique du 16<sup>ème</sup> siècle) et du revêtement biosourcé du R+1 (béton de chanvre banché) ont été déterminées par (Claude 2018). Les propriétés des blocs préfabriqués en béton de chanvre sont celles déterminées au Chapitre 2. Le Tableau 27 rassemble les caractéristiques de base des matériaux utilisés pour la mise en place des simulations.

Tableau 27 - Caractéristiques de base du béton de chanvre et de la brique saisies dans Delphin.

| Indice utilisé dans Delphin | Paramètre                           | Unités                         | CHMK  | LTCH  | R+1 (CC1) | Brique 16 <sup>ème</sup> |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-----------|--------------------------|
| $\rho$                      | Masse volumique sèche               | kg/m <sup>3</sup>              | 550   | 650   | 440       | 1616                     |
| $c_p$                       | Capacité thermique sèche            | J/(kg.K)                       | 1000  | 1000  | 752*      | 800                      |
| $\theta_{por}$              | Porosité ouverte                    | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 0,730 | 0,725 | 0,789     | 0,388                    |
| $\theta_{eff}$              | Teneur en eau à saturation          | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 0,729 | 0,724 | 0,788     | 0,388                    |
| $\theta_{cap}$              | Teneur en eau capillaire            | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 0,345 | 0,354 | 0,305     | 0,275                    |
| $\lambda_{dry}$             | Conductivité thermique (fil chaud)  | W/(m.K)                        | 0,135 | 0,139 | 0,078     | 0,39                     |
| $A_w$                       | Coefficient d'absorption capillaire | kg/(m <sup>2</sup> .√s)        | 0,345 | 0,354 | 0,196     | 0,49                     |
| $\mu$                       | Perméabilité à la vapeur d'eau      | [-]                            | 1,56  | 2,21  | 5,5       | -                        |

Les indices suivis d'un \* ont été calculés et non mesurés par (Claude, 2018).

Pour les valeurs de capacité thermique, les mesures avec la sonde d'effusivité au conductivimètre à plan chaud n'ont pas été effectuées car la sonde était hors service au moment des essais. Nous avons donc utilisé une approximation basée sur les valeurs tabulées de la norme ISO 10456 (AFNOR, 2008b).

### 4.1.3 Fonctions des matériaux

Les fonctions des matériaux permettent de déterminer l'évolution des processus de transferts thermiques et hydriques en fonction de la température, de la teneur en eau, de l'humidité relative ou encore de la pression capillaire dans le matériau selon la fonction considérée. Ces fonctions peuvent décrire des processus de stockage, c'est-à-dire l'évolution de quantités au sein du matériau en fonction de l'ambiance extérieure, ou des processus de transport qui correspond au déplacement de ces quantités au sein du matériau. Six fonctions différentes peuvent être saisies dans Delphin :

- transport thermique, détaillant l'évolution de la conductivité thermique du matériau en fonction de la teneur en eau ou de la température ;
- stockage thermique, déterminant le stockage d'énergie interne en fonction de la température ;
- stockage d'humidité, représentant la capacité du matériau à stocker de l'humidité en fonction de la pression capillaire ou de l'humidité relative ;
- transport de vapeur, détaillant l'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau ;
- transport liquide, caractérisant l'évolution de la conductivité ou de la diffusivité liquide en fonction de la teneur en eau ;
- transport d'air, montrant l'évolution de la perméabilité à l'air en fonction de la teneur en eau.

Ces fonctions peuvent être adaptées à partir de fonctions de matériaux proches et des caractéristiques de base du matériau à étudier. Cette approche est adoptée pour les fonctions de la brique du 16<sup>ème</sup> siècle. Elles sont recalculées automatiquement par l'algorithme de Delphin à partir de ses caractéristiques de base et des fonctions du matériau *Historical Brick* (identifiant de matériau [97] dans la bibliothèque de Delphin) au comportement hygrothermique proche.

Les fonctions peuvent également être calculées séparément et saisies dans Delphin. Le logiciel permet aussi de calculer des fonctions « par défaut » à partir des caractéristiques de base des matériaux. Les trois approches sont utilisées complémentirement pour le béton de chanvre comme expliqué dans la suite, en raison du manque de données et de la difficulté de caractériser exhaustivement ce matériau.

#### 4.1.3.1 Transport thermique

Pour la fonction de transport thermique, le modèle par défaut de Delphin est adopté dans une première approche. Ce modèle linéaire est décrit par l'équation (32).

$$\lambda(\theta_l) = \lambda_{\text{dry}} + \theta_l \times 0,56 \quad (32)$$

avec  $\lambda(\theta_l)$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau,  $\lambda_{\text{dry}}$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) la conductivité thermique du matériau sec entrée en caractéristique de base et  $\theta_l$  ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ) la teneur en eau.

#### 4.1.3.2 Stockage thermique

La fonction de stockage thermique n'est pas utilisée car le stockage de chaleur est déjà décrit par les caractéristiques de base du matériau.

#### 4.1.3.3 Stockage d'humidité - courbe de sorption

La fonction de stockage d'humidité est déterminée à l'aide de la caractérisation expérimentale par méthode gravimétrique de la courbe de sorption. Au cours de cette détermination, des échantillons de béton ont été exposés à une humidité relative ambiante fixe jusqu'à la stabilisation de leur teneur en eau. Dans le cas des déterminations menées par (Claude, 2018), pour le béton de chanvre banché, quatre points reliant la teneur en eau du matériau à une humidité relative ambiante comprise entre 12% et 87% ont été obtenus à l'aide des solutions salines saturées. Pour les blocs de béton de chanvre préfabriqués, la procédure a été décrite dans la partie 2.2.3.2.

L'algorithme de Delphin réalisant une interpolation linéaire entre les points saisis, il était nécessaire d'obtenir un plus grand nombre de points permettant de caractériser finement le comportement du matériau sur toute la gamme d'humidité relative.

Un modèle de courbe de sorption a donc été recherché en fonction de ces mesures expérimentales. Le modèle dit GAB développé par Guggenheim, Andersen et de Boer tel que mis en œuvre par (Labat *et al.*, 2016) a été choisi. Dans cette étude, ce modèle avait obtenu les meilleures performances en termes d'adéquation avec les données expérimentales.

$$u(\varphi) = \frac{C_g \times k \times \varphi}{(1 - k \times \varphi) * (1 - k \times \varphi + C_g \times k \times \varphi)} \times w_m \quad (33)$$

avec  $u(\varphi)$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) la fonction d'adsorption ou de désorption,  $\varphi$  (%) l'humidité relative,  $C_g$ ,  $k$  et  $w_m$  des coefficients déterminés par régression.

En suivant la méthode exposée par (Labat *et al.*, 2016), les coefficients  $C_g$ ,  $k$  et  $w_m$  ont été déterminés en minimisant la somme du carré des erreurs entre les valeurs mesurées expérimentalement et les valeurs renvoyées par le modèle à l'aide de la fonction GRG (gradient réduit généralisé) non linéaire du solveur de Microsoft Excel.

Les résultats obtenus par le modèle ont été comparés aux résultats expérimentaux à l'aide du coefficient de Pearson présenté par l'équation (34).

$$r_{xy} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (34)$$

avec  $r_{xy}$  le coefficient de Pearson,  $x_i$  et  $y_i$  les deux variables analysées (calculées par le modèle et mesurées expérimentalement) et  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  leurs moyennes respectives.

Ce coefficient permet de caractériser la relation linéaire entre deux variables, ici la teneur en eau expérimentale et la teneur en eau renvoyée par le modèle. Les coefficients de Pearson obtenus sont supérieurs à 0,99, indiquant une très forte relation de linéarité entre les deux variables. L'écart entre les points expérimentaux et retournés par le modèle pour le béton de chanvre banché appliqué au R+1 est observable sur la Figure 116 et pour les blocs préfabriqués appliqués au R+2 sur la Figure 117 et la Figure 118 pour les liants de type CHMK et LTCH, respectivement.

Sur la dernière figure, pour le béton de chanvre en LTCH, on observe que les courbes de désorption expérimentale et modélisée se confondent.

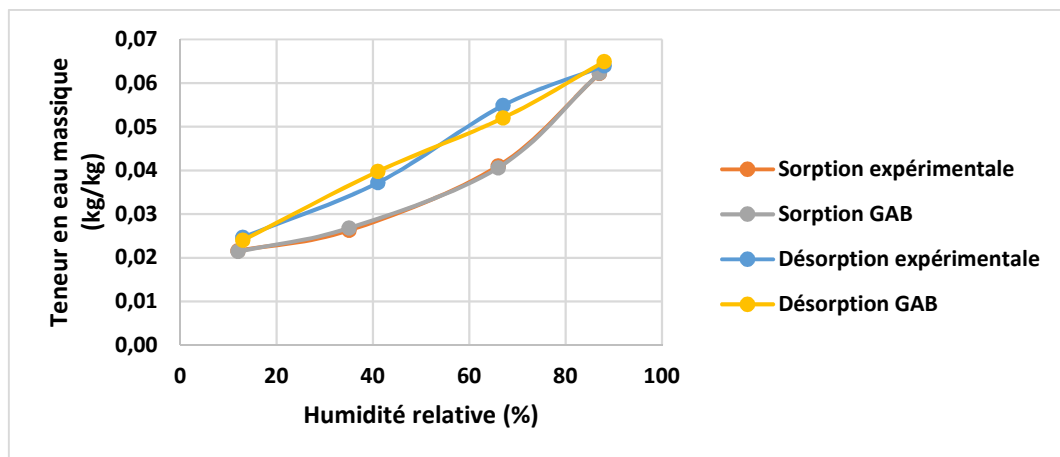


Figure 116 - Ecart entre les points de sorption expérimentaux et les points calculés par le modèle GAB pour le béton de chanvre banché (Proquez, 2021).

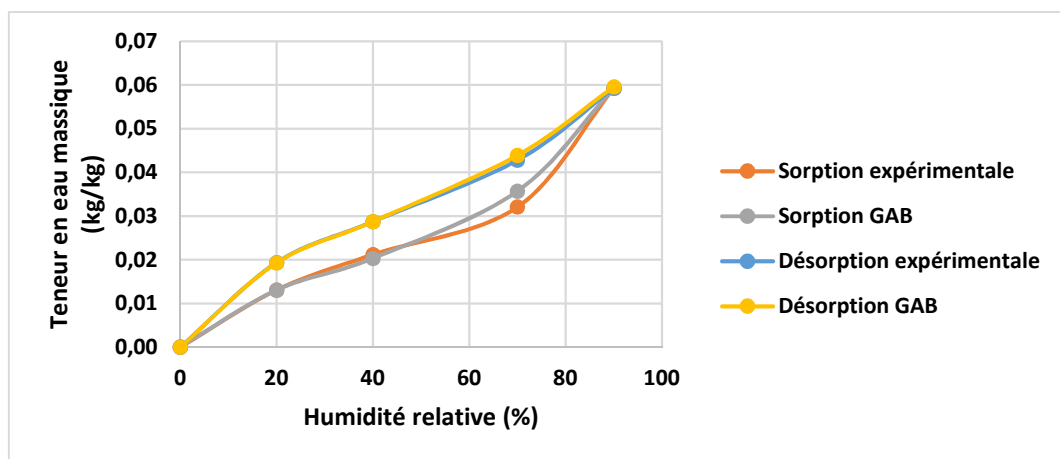


Figure 117 - Ecart entre les points de sorption expérimentaux et les points calculés par le modèle GAB pour le béton de chanvre en CHMK.

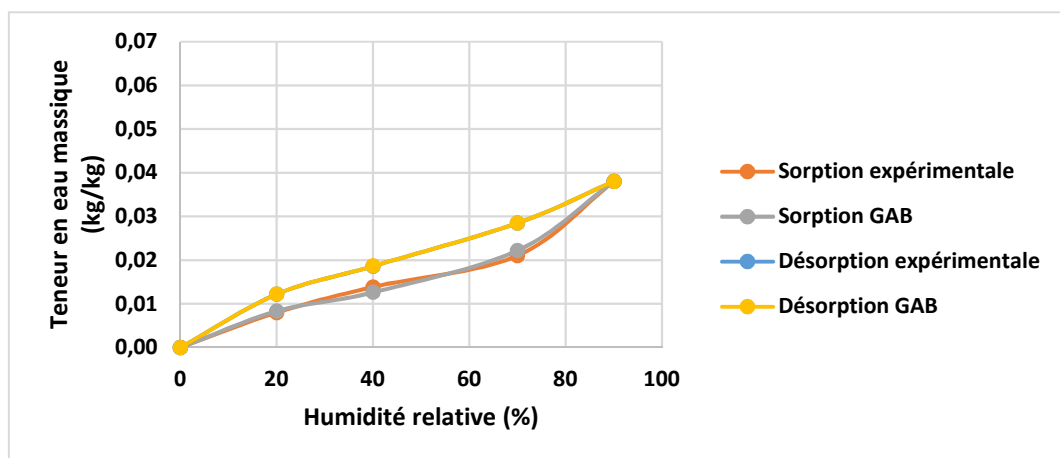


Figure 118 - Ecart entre les points de sorption expérimentaux et les points calculés par le modèle GAB pour le béton de chanvre en LTCH.

La Figure 119 présente les isothermes de sorption obtenues seulement avec le modèle GAB pour les évolutions d'humidité relative allant de 0 à 100% pour le béton de chanvre banché et les Figure 120 et Figure 121, pour les blocs préfabriqués en CHMK et LTCH, respectivement. Le phénomène d'hystérésis entre la sorption et la désorption est visible. On observe aussi des irrégularités pour les points se situant au-delà du domaine caractérisé expérimentalement. Le logiciel Delphin ne permet de stocker qu'une seule courbe de sorption. Comme conseillé dans (Vogelsang *et al.*, 2013), la courbe de désorption est saisie dans le logiciel. Une conversion en fonction des masses volumiques de l'eau et du matériau est effectuée car la teneur en eau est définie dans Delphin en ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) pour les données d'entrée.

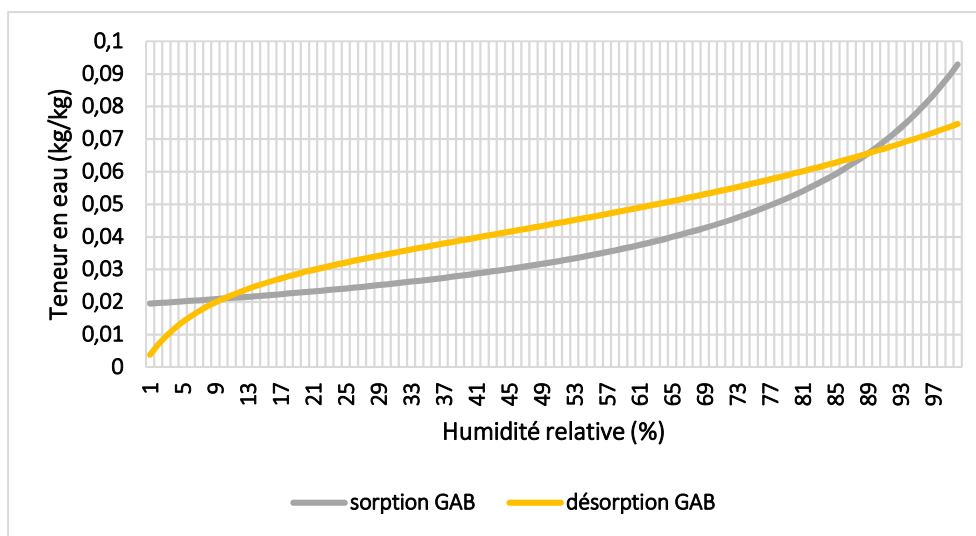


Figure 119 - Isotherme de sorption du béton de chanvre banché calculée par le modèle GAB (Proquez, 2021).

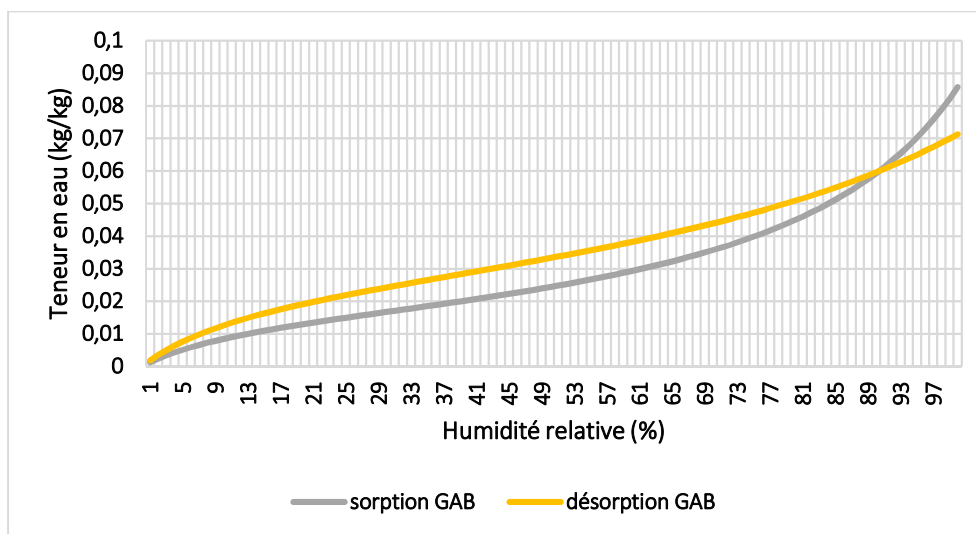


Figure 120 - Isotherme de sorption du béton de chanvre en CHMK calculée par le modèle GAB.

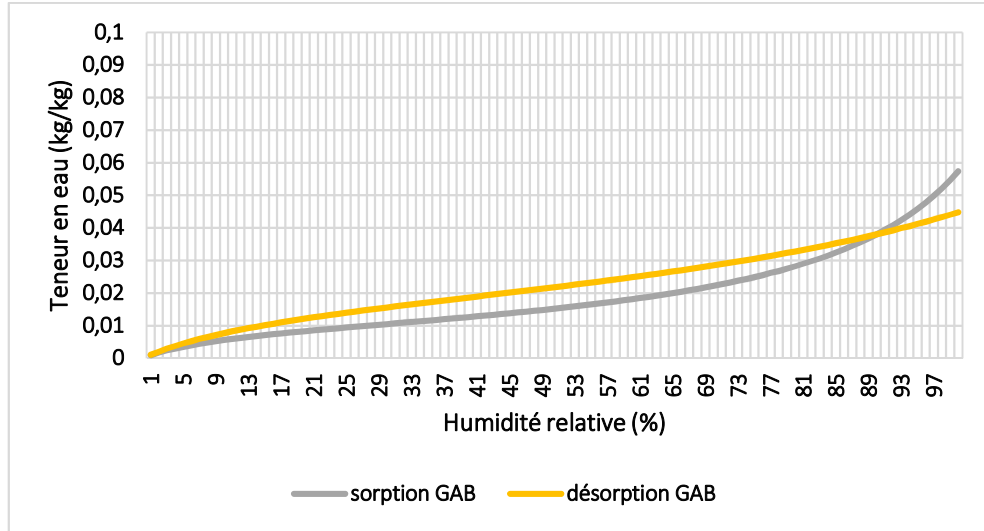


Figure 121 - Isotherme de sorption du béton de chanvre en LTCH calculée par le modèle GAB.

#### 4.1.3.4 Transport de vapeur

La fonction transport de vapeur est recalculée automatiquement par l'algorithme de Delphin en utilisant la fonction d'un matériau aux caractéristiques hygrothermiques proches, le matériau *wood fibreboard* (identifiant de matériau [435] dans la bibliothèque de Delphin).

#### 4.1.3.5 Transport liquide

La fonction de transport liquide est calculée selon un modèle diffusif présenté par l'équation (35). Cette équation proposée par (Künzel, 1995) telle que détaillée par (Seng, 2018) permet de calculer le coefficient de diffusivité hydrique à partir des données obtenues lors de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

$$D_w = 3,8 \times \frac{A_w^2}{w_{cr}^2} \times 1000 \frac{w}{w_{cr}} \quad (35)$$

avec  $D_w$  ( $m^2.s^{-1}$ ) le coefficient de transfert liquide,  $A_w$  ( $kg.m^{-2}.s^{-1/2}$ ) le coefficient d'absorption capillaire,  $w_{cr}$  ( $kg.m^{-3}$ ) la teneur en eau critique et  $w$  ( $kg.m^{-3}$ ) la teneur en eau.

Une conversion de la teneur en eau est effectuée afin de l'exprimer en ( $m^3.m^{-3}$ ) conformément au système d'unités de Delphin. La fonction obtenue est tracée en coordonnées logarithmiques et comparées aux données de (Evrard, 2008) pour un béton de chanvre sur la Figure 122.

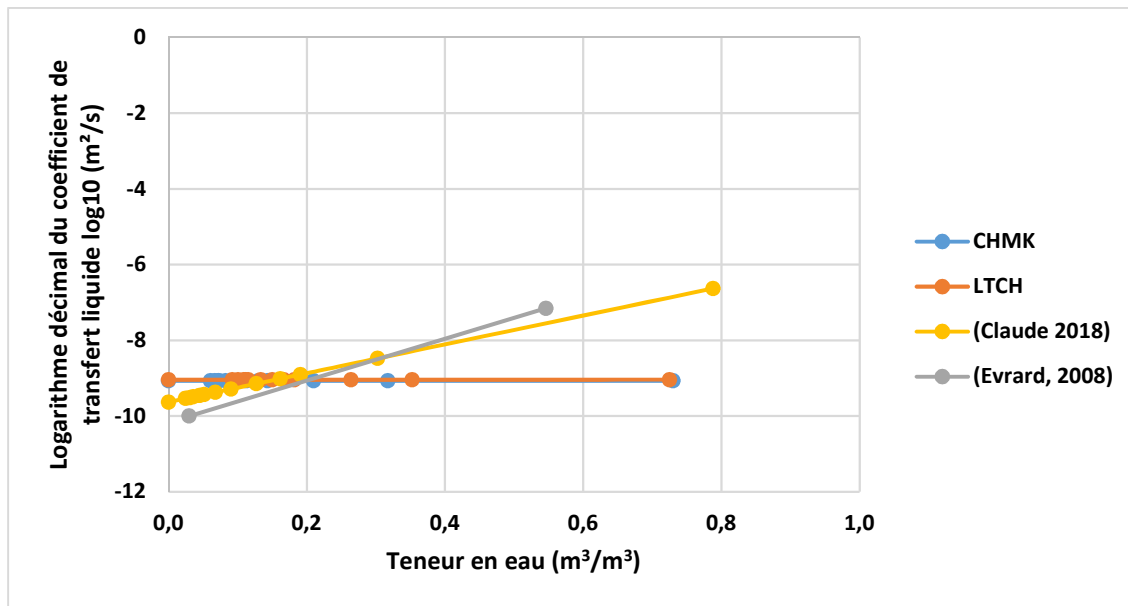


Figure 122 - Comparaison de la diffusivité liquide calculée avec les valeurs de (Evrard, 2008).

Le logarithme décimal de cette fonction est ensuite implémenté dans Delphin conformément à son mode de saisie.

#### 4.1.3.6 Transport d'air

En raison du manque de données sur sa perméabilité à l'air, le matériau est considéré comme étant imperméable à celui-ci, ce qui conduit à ne pas saisir de fonction de transport d'air.

### 4.1.4 Données climatiques

Les données climatiques extérieures proviennent de la station météorologique située sur le toit de la mairie de Cahors, située à 400 mètres des appartements étudiés. Les données climatiques intérieures proviennent de l'instrumentation des appartements, et plus particulièrement des thermohygromètres de type KIMO placés dans l'ambiance des différentes pièces étudiées. Le jeu de données disponibles jusqu'à présent permet d'effectuer une simulation sur 1 an avec un pas de temps d'une heure, débutant le 15/03/2021 à 0h et finissant le 15/03/2022 à 0h. On rappelle qu'au R+1, ces données sont continues sur un seul type de revêtement. Au R+2, le changement du revêtement de la paroi au cours du temps réduit la période d'analyse pour les plaques en béton de chanvre préfabriquées entre le 17/11/2021 et le 15/03/2022 (cf. Figure 77).

Les données de la station météorologique sont converties en un fichier au format .c6b lisible par Delphin à l'aide du logiciel CCM editor fourni par les éditeurs. Ce fichier météorologique doit idéalement comporter la température (en °C), l'humidité relative (en %), la direction du vent (en deg) et sa vitesse (en  $\text{m.s}^{-1}$ ), la pression de l'air (en Pa), la pluie (en  $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ) et un détail des rayonnements solaires directs et diffus, et du rayonnement aux grandes longueurs d'ondes réfléchi (en  $\text{W.m}^{-2}$ ). La station météorologique permet d'obtenir toutes ces valeurs à l'exception du détail des rayonnements solaires. En effet, elle ne possède qu'une mesure du rayonnement global sur une surface horizontale. Le fichier météorologique est donc créé sans données sur les rayonnements solaires pour les 8640 heures de mesures comme si la première mesure avait lieu la première heure de l'année.

Comme dit précédemment, le logiciel EnergyPlus est utilisé pour calculer le rayonnement solaire incident aux façades étudiées avec comme données d'entrée le rayonnement solaire global et la morphologie urbaine de l'îlot de bâtiments dans lequel se trouvent les appartements étudiés selon la méthodologie décrite par (Claude, 2018). Les données ainsi obtenues sont utilisées en conditions aux limites pour chaque paroi et permettent de compenser le fait que le rayonnement solaire n'est pas pris en compte dans le fichier météorologique.

La Figure 123 montre les flux solaires obtenus pour le R+1 et le R+2. Les différences sont variables entre les deux étages. Le pic de rayonnement est systématiquement plus faible pour le R+1 que pour le R+2 et ces différences restent relativement faibles autour de  $20 \text{ W.m}^{-2}$  jusqu'à début mai. A partir de cette période, le rayonnement solaire du R+2 présente des très forts pics et les différences se creusent pour atteindre des écarts d'environ  $300 \text{ W.m}^{-2}$  sur les plus forts pics.

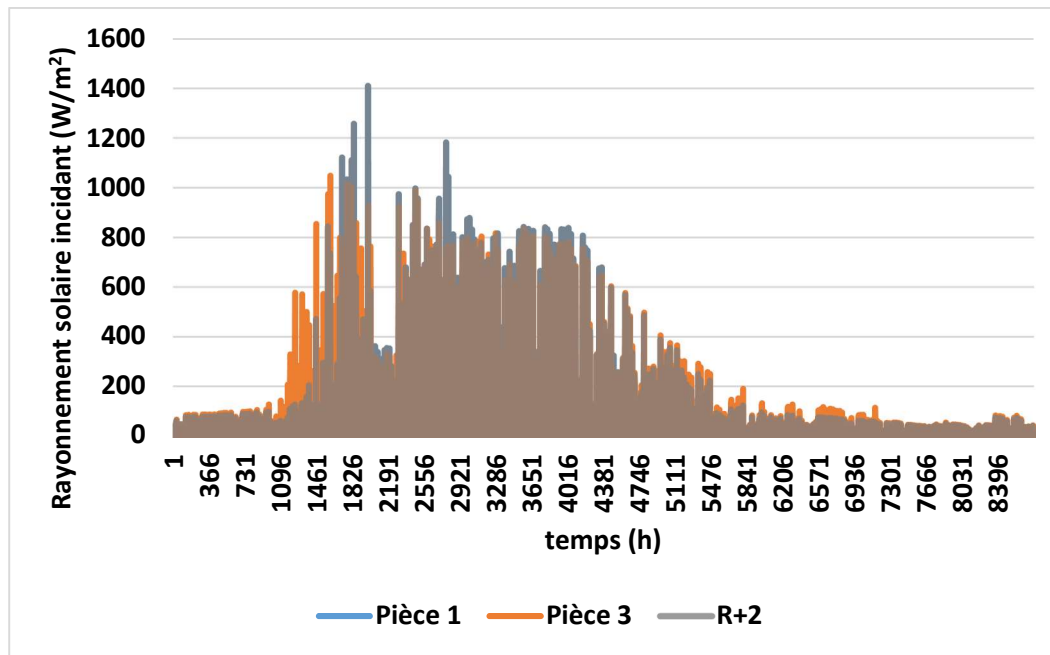


Figure 123 - Rayonnements solaires au R+1 (pièces 1 et 3) et au R+2 calculés dans EnergyPlus entre le 15/03/2021 et le 15/03/2022.

L'ambiance intérieure est caractérisée plus simplement grâce aux données de températures et d'humidité relatives relevées par les thermohygromètres de type KIMO.

#### 4.1.5 Conditions aux limites

Les données climatiques précédemment détaillées sont implémentées dans Delphin afin de définir les conditions aux limites du problème.

##### 4.1.5.1 Conditions aux limites sur le flux de chaleur

Les conditions aux limites des équations d'équilibre du flux de chaleur sont définies en conditions de Cauchy, c'est-à-dire que l'échange de chaleur est défini via un coefficient d'échange et la différence entre la température de surface de l'élément et la température ambiante de l'air selon l'équation (36).

$$j_{\text{diff}}^Q = h \times (T_{\text{element}} - T_{\text{ambient}}) \quad (36)$$

avec  $j_{\text{diff}}^Q$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) le flux de chaleur à la limite,  $h$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) le coefficient d'échange superficiel de chaleur,  $T_{\text{element}}$  (K) la température de surface du matériau et  $T_{\text{ambient}}$  (K) la température de l'air ambiant.

Le coefficient d'échange superficiel pour l'extérieur est calculé en fonction de la vitesse du vent mesurée proche de la surface en question, selon la norme EN 15026 (AFNOR, 2008a). Nous avons adopté la valeur égale à  $12 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  validée par (Claude, 2018). Pour l'intérieur, le coefficient d'échange superficiel est calculé en fonction de l'émissivité de grande longueur d'onde de la surface selon cette même norme. Nous avons adopté la valeur de  $8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , correspondant à une émissivité de 0,96 [-], conformément à la valeur déterminée par (Claude, 2018).

#### 4.1.5.2 Conditions aux limites sur le flux de vapeur

De même, les conditions aux limites sur la diffusion de la vapeur sont définies avec des conditions de Cauchy à partir d'un coefficient d'échange de vapeur d'eau et de la différence entre la pression de vapeur à la limite de l'élément et la pression de vapeur dans l'air ambiant selon l'équation (37).

$$j_{\text{diff}}^{\text{mv}} = \beta_v \times (p_v^{\text{element}} - p_v^{\text{ambient}}) \quad (37)$$

avec  $j_{\text{diff}}^{\text{mv}}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) le flux de vapeur,  $\beta_v$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ) le coefficient d'échange de vapeur à la limite,  $p_v^{\text{element}}$  (Pa) la pression de vapeur en surface du matériau,  $p_v^{\text{ambient}}$  (Pa) la pression de vapeur de l'air ambiant calculée à partir de l'humidité relative et de la température de l'air ambiant.

Le coefficient d'échange de vapeur à la limite ( $\beta_v$ ) dépend principalement des processus convectifs près de la surface. Il est donc possible de déterminer ce coefficient par analogie avec la partie convective du coefficient d'échange thermique. C'est ce qu'on appelle la relation de Lewis, décrite selon l'équation (38).

$$\beta_v = \frac{h_c}{R_v \times T \times \rho_{\text{air}} \times c_{\text{air}}} \times \text{Le}^{-3/4} \quad (38)$$

avec  $\beta_v$  ( $\text{s.m}^{-1}$ ) le coefficient d'échange de vapeur,  $h_c$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) le coefficient de transfert thermique par convection,  $R_v$  ( $\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ) la constante des gaz parfait,  $T$  (K) la température,  $\rho_{\text{air}}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) la masse volumique de l'air,  $c_{\text{air}}$  ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) la capacité thermique de l'air et  $\text{Le}$  (-) le nombre de Lewis.

Le nombre de Lewis ( $\text{Le}$ ) est défini comme le rapport de la diffusivité thermique à la diffusivité de vapeur dans l'air. Pour une pression d'air constante et une faible vitesse d'air, le nombre de Lewis est proche de 1. Pour une pression normale de 101325 Pa et de l'air sec on peut donc utiliser la formulation simplifiée de l'équation (39).

$$\beta_v \approx 6,1 \times 10^{-9} \times h_c \quad (39)$$

avec  $\beta_v$  ( $\text{s.m}^{-1}$ ) le coefficient d'échange de vapeur et  $h_c$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) le coefficient de transfert thermique par convection.

Le coefficient de transfert thermique par convection ( $h_c$ ) peut être déterminé selon la norme ISO 6946 (BSI, 2017) par l'équation (40).

$$h_c = 4 + 4 \times v \quad (40)$$

avec  $h_c$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) le coefficient de transfert thermique par convection et  $v$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) la vitesse du vent à proximité de la surface.

Le logiciel propose un coefficient d'échange de vapeur à la limite ( $\beta_v$ ) dépendant de la vitesse de l'air (applicable en conditions de Cauchy) calculé selon l'équation (41).

$$\beta_v = \beta_0 + k_{\text{slope}} \times v^{k_{\text{exp}}} \quad (41)$$

avec  $\beta_v$  ( $\text{s.m}^{-1}$ ) le coefficient d'échange de vapeur d'eau,  $\beta_0$  ( $\text{s.m}^{-1}$ ) le coefficient d'échange de base (pour  $v = 0$  m/s),  $k_{\text{slope}}$  ( $\text{s}^2.\text{m}^{-2}$ ) un coefficient,  $v$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) la vitesse du vent obtenue à partir des données météorologiques et  $k_{\text{exp}}$  (-) un coefficient.

Les coefficients d'échange de base entrés dans le logiciel sont égaux à  $7,5 \times 10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$  pour l'extérieur et  $2,5 \times 10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$  pour l'intérieur. Les coefficients convectifs de surface dépendent de la structure des pores et de la rugosité de la façade extérieure et ont été déterminés par (Claude, 2018).

#### 4.1.5.3 Conditions aux limites sur le rayonnement solaire

Une condition aux limites doit être fixée en partie extérieure du mur afin de prendre en compte l'apport de chaleur dû au rayonnement solaire. Elle est définie avec une condition de Neumann, c'est-à-dire qu'un flux est imposé à la limite de l'élément. Cette condition est décrite par l'équation (42).

$$j_{\text{swrad}}^Q = a_{\text{sw}} \times j_{\text{imp}}^Q \quad (42)$$

avec  $j_{\text{swrad}}^Q$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) le flux de chaleur dû au rayonnement solaire aux courtes longueurs d'ondes,  $a_{\text{sw}}$  (-) le coefficient d'absorption du rayonnement solaire compris entre 0 pour une paroi n'absorbant pas le rayonnement solaire et 1 pour une paroi en absorbant la totalité et  $j_{\text{imp}}^Q$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) le rayonnement solaire incident imposé.

Le coefficient d'absorption du rayonnement solaire dépend principalement de la couleur de finition de la surface. Toutes les surfaces étudiées étant en brique, la valeur de  $a_{\text{sw}}$  est fixée à 0,7, conformément à la valeur citée par (Dornelles *et al.*, 2007).

#### 4.1.5.4 Conditions aux limites sur la pluie battante

L'apport d'eau liquide lié à la pluie battante est aussi fixé en partie extérieure du mur. Il est calculé selon un modèle implémenté dans Delphin selon l'équation (43).

$$j_{\text{conv}}^{m_w} = \min (j_{\text{normal}}^{m_w} ; j_{\text{max}}^{m_w}) \quad (43)$$

avec  $j_{\text{conv}}^{m_w}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) le flux massique convectif d'eau liquide dû à la pluie battante,  $j_{\text{max}}^{m_w}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) le flux massique d'eau maximum admissible dans le matériau,  $j_{\text{normal}}^{m_w}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) la densité de flux de pluie normale à la paroi calculée à partir de la densité de flux de pluie horizontale, du coefficient d'exposition et de l'orientation et de la force du vent.

Par défaut, le coefficient d'exposition (variant entre 0 et 1) est fixé à 1, ce qui correspond à une paroi très exposée à la pluie, ce qui correspond bien au positionnement de la façade étudiée, sans influence des bâtiments aux alentours.

Ce choix de définition de conditions aux limites a été réalisé afin de bénéficier de données climatiques représentatives des phénomènes et continues sur toute la durée de la simulation. En effet, il aurait été possible de définir les conditions aux limites sur les flux de chaleur en condition de Dirichlet en imposant une température de surface. L'approche en condition de Cauchy a néanmoins été privilégiée car les mesures de température de surface ont été interrompues à plusieurs reprises sur la période de simulation considérée en raison de questions techniques des centrales d'acquisition au R+1. Les thermohygromètres KIMO, en tant qu'appareils de mesure indépendants, et la station météorologique n'ont pas subi ces interruptions.

De plus, des capteurs de température de surface extérieure des murs n'étaient initialement présents qu'au R+1. Or, la simulation du rayonnement solaire incident aux parois réalisée dans EnergyPlus (cf. partie 4.1.4) montre bien qu'utiliser la température de surface du premier étage pour une simulation du second étage entraîne la sous-estimation de la température de surface de ce dernier.

Ces constats soulignent la difficulté de créer une simulation à partir de données expérimentales, et plus particulièrement d'une expérimentation évolutive et *in-situ*.

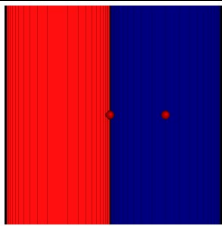
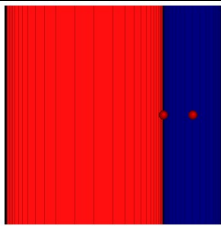
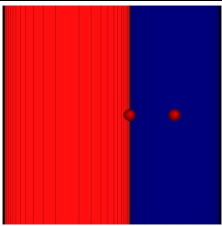
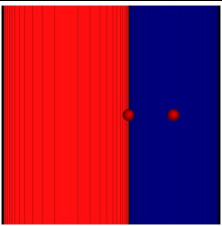
#### 4.1.6 Conditions initiales et maillage

Les conditions initiales au R+1 sont fixées uniformément à 15°C et à 50% d'humidité relative dans tout le mur. Pour le R+2, l'analyse des données *in-situ* après la mise en place des plaques préfabriquées nous a conduit à utiliser 15°C et 80% d'humidité relative.

Dans le logiciel Delphin, il est possible d'affecter des conditions initiales par maille. Une autre possibilité pour diminuer l'impact des conditions initiales est de faire tourner la simulation « en boucle », c'est-à-dire de recommencer plusieurs simulations successivement, chaque simulation utilisant comme condition initiale les données finales de la simulation précédente.

Le maillage est dans un premier temps généré automatiquement. Ainsi, le facteur d'étirement est de 1,3 et les éléments compris entre 1 mm au minimum et 5 cm au maximum. La quantité de mailles par pièce étudiée est indiqué dans le Tableau 28.

Tableau 28 - Vue et composition des maillages des quatre configurations étudiées : en rouge la paroi en briques et en bleu le revêtement biosourcé.

| Local             | R+1 pièce 1                                                                       | R+1 pièce 3                                                                       | R+2 CHMK                                                                           | R+2 LTCH                                                                            |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Vue               |  |  |  |  |
| Nombre de mailles | 47                                                                                | 55                                                                                | 46                                                                                 | 46                                                                                  |

## 4.2 Résultats des simulations

Dans cette partie, nous présentons les résultats des simulations menées en les comparant avec les valeurs mesurées dans chaque pièce. Comme expliqué précédemment, pour le R+1 les comparaisons sont possibles pour une année entière, entre le 15/03/2021 et le 15/03/2022. Au R+2, la paroi en polystyrène a été étudiée par (Proquez, 2021), nous présentons donc seulement les résultats pour les plaques préfabriqués en béton de chanvre, entre le 17/11/2021 et le 15/03/2022.

### 4.2.1 Méthode de validation des résultats

L'adéquation entre les valeurs mesurées et simulées est attestée en comparant les valeurs d'humidité relative et de température relevées par les sondes Honeywell avec celles simulées pour le même emplacement (mibio ou interf, cf. Figure 96 au Chapitre 3).

La comparaison entre les valeurs expérimentales et simulées se fait au moyen d'indices statistiques. Comme souligné par (Huerto-Cardenas *et al.*, 2020), l'utilisation combinée de plusieurs indices statistiques permet de souligner différents aspects des résultats. Dans cette perspective, le coefficient de Pearson déjà employé et défini pour valider le modèle GAB de sorption (cf. équation (34)) est utilisé conjointement avec l'indice d'erreur absolue moyenne (MAE) défini selon l'équation (44).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |m_i - s_i|}{n} \quad (44)$$

avec MAE l'erreur absolue moyenne dans l'unité de la valeur mesurée et simulée,  $n$  le nombre de prises de mesures,  $m_i$  la valeur mesurée à la prise de mesure  $i$ ,  $s_i$  la valeur simulée à la prise de mesure  $i$ .

(Huerto-Cardenas *et al.*, 2020) proposent deux niveaux de validation de la précision des simulations hygrothermiques dans le bâti ancien utilisant ces indices statistiques. Les deux niveaux requièrent un coefficient de corrélation de Pearson supérieur à 0,5. Le premier niveau correspond à une « haute précision » du modèle à simuler le comportement réel et impose une erreur absolue moyenne inférieure à 1°C pour les mesures en température et à 5% pour les mesures d'humidité relative. Le second niveau correspond à une « faible précision » du modèle et fait passer ces valeurs à 2°C et 10% respectivement.

#### 4.2.2 Etage R+1 - Pièce 1 - Paroi ossature en pan de bois et revêtement en béton de chanvre banché

La Figure 124 présente les résultats de température et la Figure 125 les résultats d'humidité relative pour la pièce 1 au R+1. Les températures et les humidités relatives semblent décrites de manière satisfaisante pour les emplacements étudiés. On note cependant une amplitude du signal simulé plus importante que le signal mesuré.

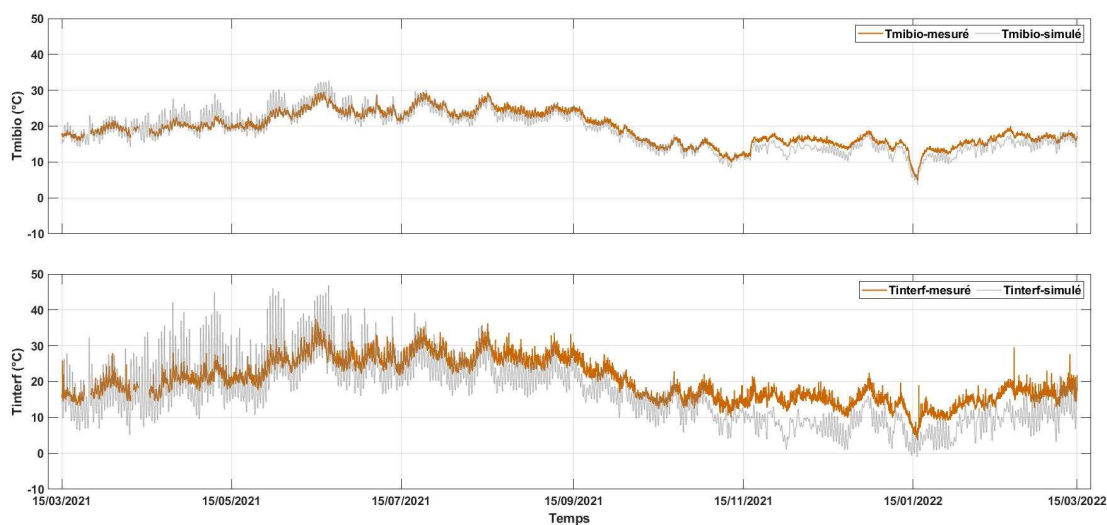


Figure 124 - Comparaison des résultats de température mesurés et simulés pour le R+1 - Pièce 1.

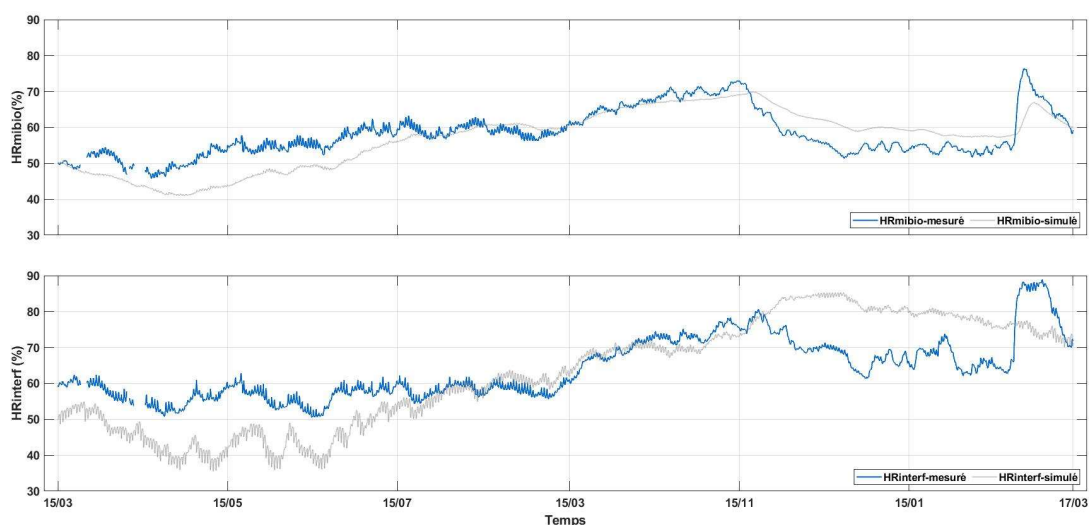


Figure 125 - Comparaison des résultats d'humidité relative mesurés et simulés pour le R+1 - Pièce 1.

On observe que les simulations d'humidité relative concordent globalement moins bien avec les valeurs mesurées que les simulations précédentes de la température.

Le Tableau 29 présente les résultats des coefficients de Pearson et l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour la pièce 1.

Tableau 29 - Coefficient de Pearson et erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour la pièce 1.

| Variable               | Tmibio | Tinterf | HRmibio | HRinterf |
|------------------------|--------|---------|---------|----------|
| Coefficient de Pearson | 0,96   | 0,87    | 0,75    | 0,69     |
| MAE                    | 1,6°C  | 5,2°C   | 4,3%    | 8,7%     |

On note que pour les valeurs de température le coefficient de Pearson est supérieur à 0,5, montrant une bonne corrélation de l'évolution des variables mesurées et simulées. Toutefois, l'erreur absolue moyenne est trop élevée pour permettre de valider la simulation d'après les critères avancés par (Huerto-Cardenas *et al.*, 2020), surtout pour les données à l'interface entre le mur et le revêtement. La température semble en permanence sous-estimée par la simulation.

Pour les données d'humidité relative, les résultats au cœur du revêtement biosourcé présentent aussi des facteurs de corrélation plus intéressants. Même si les valeurs du coefficient de Pearson sont supérieures à 0,5, les MAEs sont encore trop importantes. De plus, certains pics dans les

valeurs expérimentales semblent ne pas être pris en compte par la simulation, comme la période d'humidification en fin février 2022, par exemple.

Les écarts plus importants pour les données d'humidité relative sont aussi observés dans la littérature. Selon (Busser *et al.*, 2019), l'humidité relative est légèrement sous-estimée dans les simulations malgré des températures simulées inférieures aux valeurs mesurées. Ceci peut être le signe d'une sous-estimation de la teneur en eau dans le matériau par les simulations.

L'écart entre les valeurs à l'interface doit être examiné avec prudence. Comme dit au Chapitre 3, les sondes à cet emplacement étaient plus bruitées que celles positionnées au cœur du revêtement biosourcé. De plus, l'emplacement réel des sondes est difficilement obtenu car elles ont été positionnées après l'exécution du revêtement par forage, même si nous avons pris beaucoup de soin au moment de percer.

Enfin, pour améliorer le modèle, au début des simulations, les conditions initiales pourraient être adaptées aux conditions expérimentales réelles maille par maille.

#### **4.2.3 Etage R+1 - Pièce 3 - Mur ossature brique massive et revêtement en béton de chanvre banché**

La Figure 126 présente les résultats de température mesurés et simulés et la Figure 127 les résultats d'humidité relative mesurés et simulés pour la pièce 3 au R+1. Comme pour la pièce 1, les températures et les humidités relatives mesurées semblent décrites de manière satisfaisante par les valeurs simulées pour les emplacements étudiés.

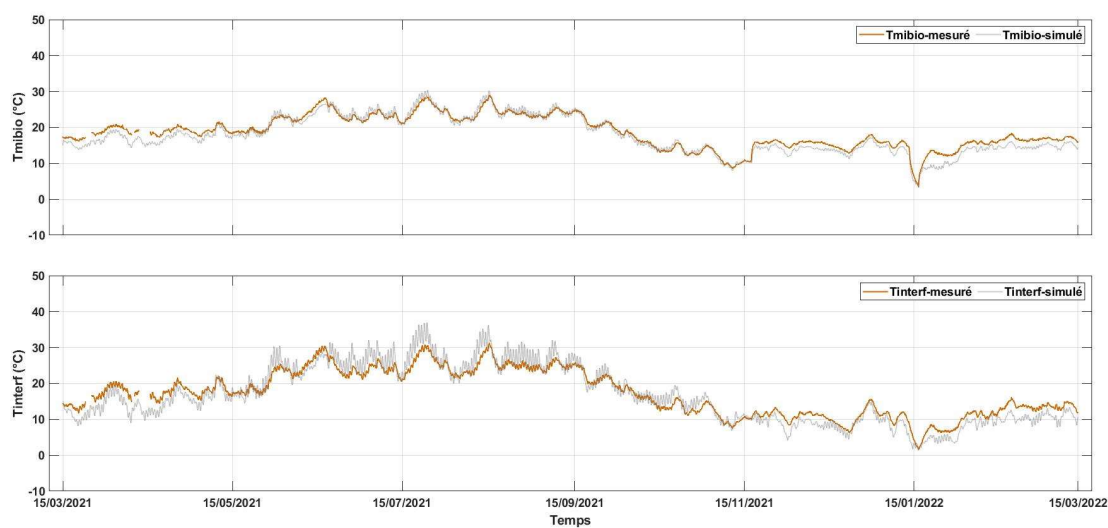


Figure 126 - Comparaison des résultats de température mesurés et simulés pour le R+1 - Pièce 3.

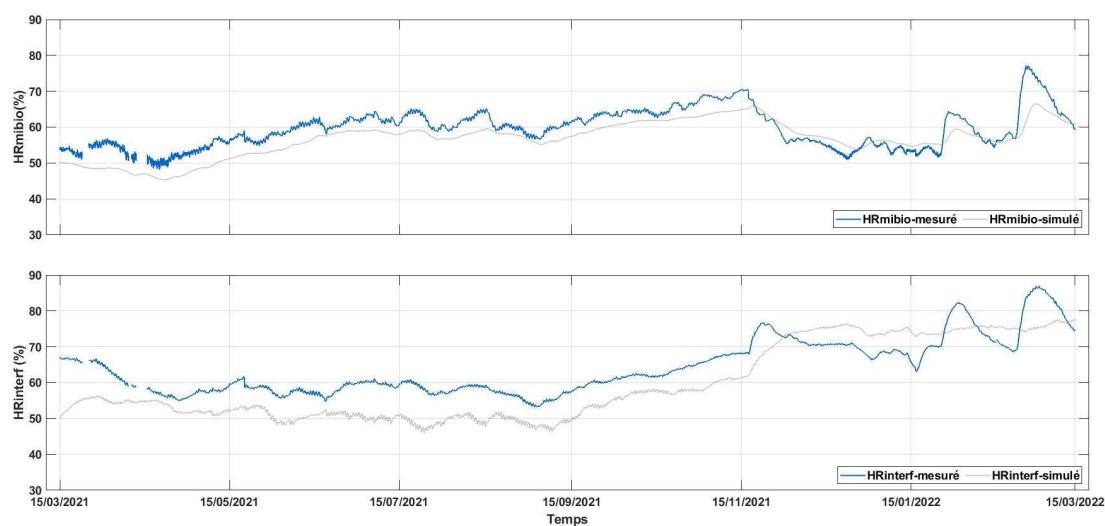


Figure 127 - Comparaison des résultats d'humidité relative mesurés et simulés pour le R+1 - Pièce 3.

Le Tableau 30 présente les résultats des coefficients de Pearson et l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour la pièce 3.

Tableau 30 - Coefficient de Pearson et erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour la pièce 3.

| Variable               | Tmibio | Tinterf | HRmibio | HRinterf |
|------------------------|--------|---------|---------|----------|
| Coefficient de Pearson | 0,98   | 0,96    | 0,84    | 0,88     |
| MAE                    | 1,2°C  | 2,3°C   | 3,5%    | 6,5%     |

Les ordres de grandeur des coefficients de Pearson et des MAEs pour les pièces 1 et 3 au R+1 sont similaires. Cela montre l'efficacité du modèle développé à prévoir le comportement des bâtiments à Cahors pour les deux typologies constructives analysées. On observe que, pour les données d'humidité relative, les MAEs sont beaucoup plus importants que pour les données de température que ce soit à l'interface ou au cœur de revêtement. De plus, les valeurs à l'interface sont toujours plus importantes que les mibio. Cela peut être expliqué par la quantité plus importante de paramètres impliqués en conditions aux limites du côté extérieur par rapport au côté intérieur.

#### 4.2.4 Etage R+2 - Mur ossature pan de bois et revêtement en béton de chanvre préfabriqué

La Figure 128 présente les résultats en température mesurés et simulés pour le R+2 avec les plaques en CHMK alors que la Figure 129 présente les résultats en humidité relative mesurés et simulés pour la période analysée (4 mois d'hiver).

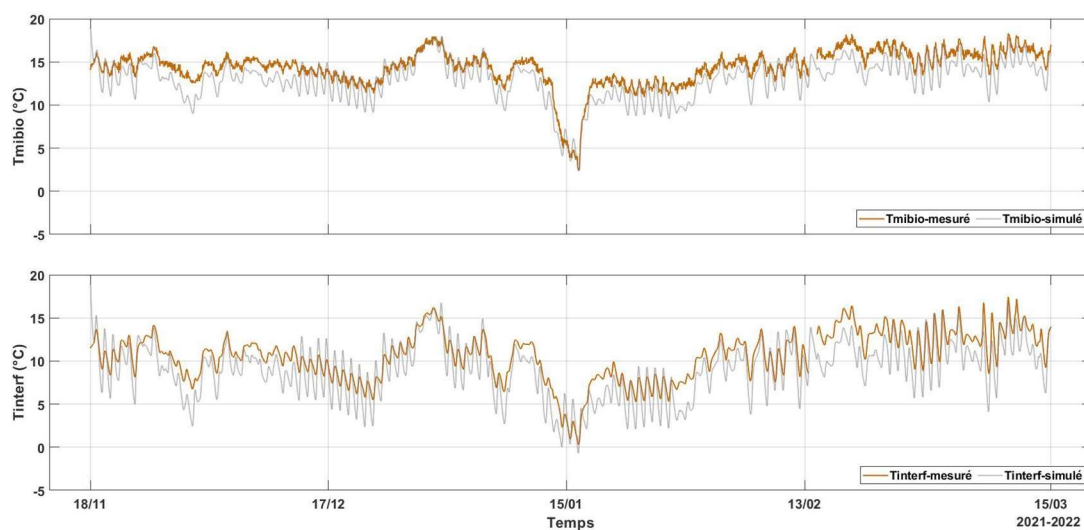


Figure 128 - Comparaison des résultats de température mesurés et simulés pour les plaques en CHMK au R+2.

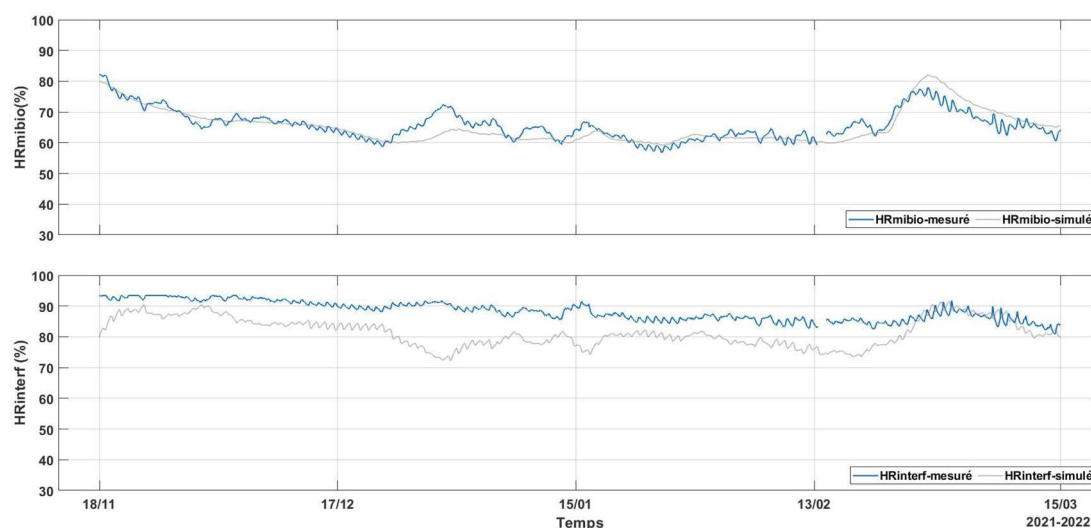


Figure 129 - Comparaison des résultats d'humidité relative mesurés et simulés pour les plaques en CHMK au R+2.

Le Tableau 31 présente les résultats des coefficients de Pearson et l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour les plaques en CHMK au R+2.

Tableau 31 - Coefficient de Pearson et erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour les plaques en CHMK au R+2.

| Variable               | Tmibio | Tinterf | HRmibio | HRinterf |
|------------------------|--------|---------|---------|----------|
| Coefficient de Pearson | 0,92   | 0,90    | 0,86    | 0,43     |
| MAE                    | 1,5°C  | 2,0°C   | 2,1%    | 7,0%     |

Pour une période d'analyse plus courte par rapport à celle du R+1, on observe que le modèle numérique simule de façon plus représentative les humidités relatives au milieu du revêtement, principalement après une augmentation importante des conditions aux limites (période d'humidification). Les erreurs moyennes sont toujours plus importantes à l'interface par rapport au mibio pour les données de température et d'humidité.

Ici on observe que les conditions initiales appropriées du modèle sont un facteur important affectant la fiabilité des calculs. Les humidités relatives mesurées au R+2 révèlent un taux d'humidité initiale élevé à l'interface entre le mur et les blocs et au cœur du revêtement. Cela peut être attribué à la redistribution de l'humidité apporté par l'enduit de collage pendant la mise en place des plaques comme discuté au début du Chapitre 3. L'application d'une condition

initiale transitoire de simulation liée aux conditions réelles *in-situ* permettrait de corriger cette problématique.

La Figure 130 présente les résultats en température mesurés et simulés pour le R+2 avec les plaques en LTCH, et la Figure 131 présente les résultats en humidité relative mesurés et simulés pour la période analysée.

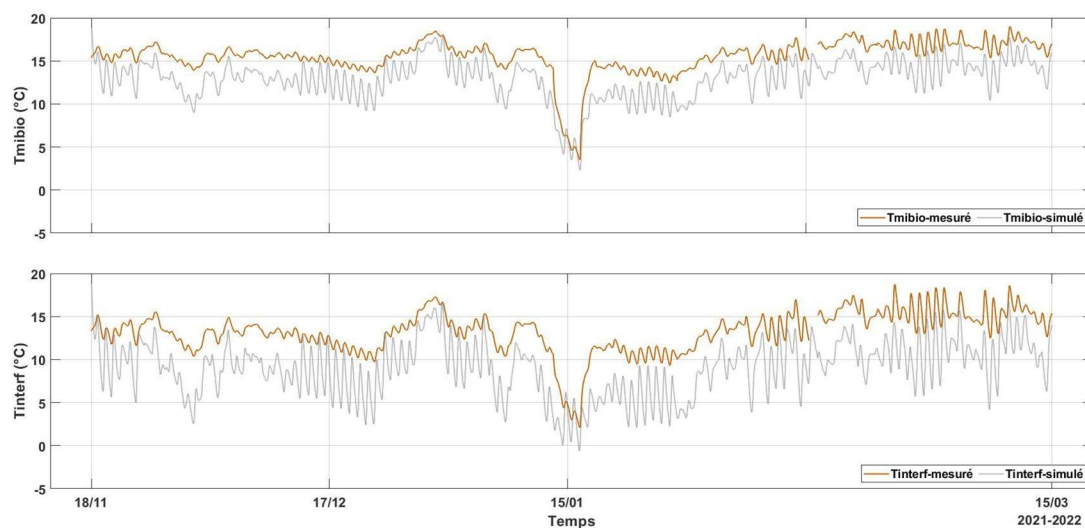


Figure 130 - Comparaison des résultats de température mesurés et simulés pour les plaques en LTCH au R+2.

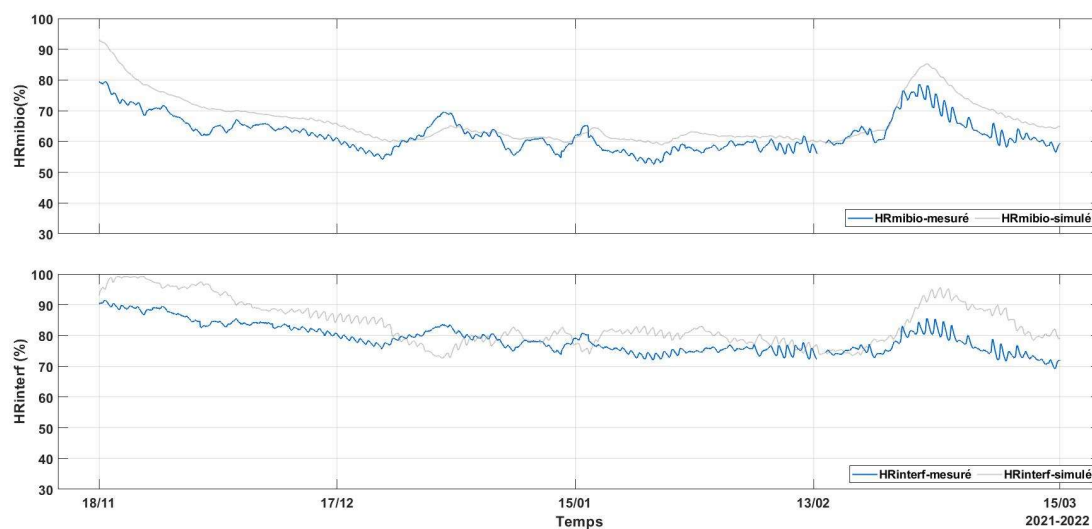


Figure 131 - Comparaison des résultats d'humidité relative mesurés et simulés pour les plaques en LTCH au R+2.

Le Tableau 32 présente les résultats des coefficients de Pearson et l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour le R+2 LTCH.

Tableau 32 - Coefficient de Pearson et erreur absolue moyenne (MAE) entre les données expérimentales et simulées pour les plaques en LTCH au R+2.

| Variable               | Tmibio | Tinterf | HRmibio | HRinterf |
|------------------------|--------|---------|---------|----------|
| Coefficient de Pearson | 0,91   | 0,84    | 0,88    | 0,69     |
| MAE                    | 2,6°C  | 4,3°C   | 4,6%    | 6,1%     |

On observe que le comportement des courbes simulées et mesurées pour les deux types de plaques utilisées au R+2 est similaire. Cela met en évidence la capacité du modèle à bien représenter les conditions *in-situ* et aussi la justesse de la caractérisation des matériaux présentée au Chapitre 2.

En comparant les valeurs de température simulées et mesurées des plaques en CHMK et LTCH, on observe que l'utilisation d'une même température comme condition initiale du problème ne semble pas être appropriée. On estime que les écarts entre les valeurs simulées et mesurées plus importants pour les plaques en LTCH est dû à une sous-estimation de la température initiale car on avait constaté que les températures de surface de ces plaques pendant la période de chauffe étaient plus importantes que celles pour les plaques en CHMK (du fait certainement de leur position et de l'absence d'homogénéisation de la température dans la pièce). Cela met encore en évidence l'importance des conditions initiales et aux limites.

De façon globale, les comparaisons entre les cas de référence simulés et les valeurs de température et d'humidité fournies par les Honeywell montrent une capacité limitée du modèle à prévoir le comportement hygrothermique des parois étudiées. La corrélation entre résultats expérimentaux et simulations illustrée par le coefficient de Pearson est globalement plus haute pour les valeurs de température que pour les valeurs d'humidité relative (cf. Figure 132 et Figure 133). Dans les deux cas, la difficulté de simuler le comportement des parois anciennes en utilisant des données *in-situ* comme données d'entrée et de validation est soulignée.

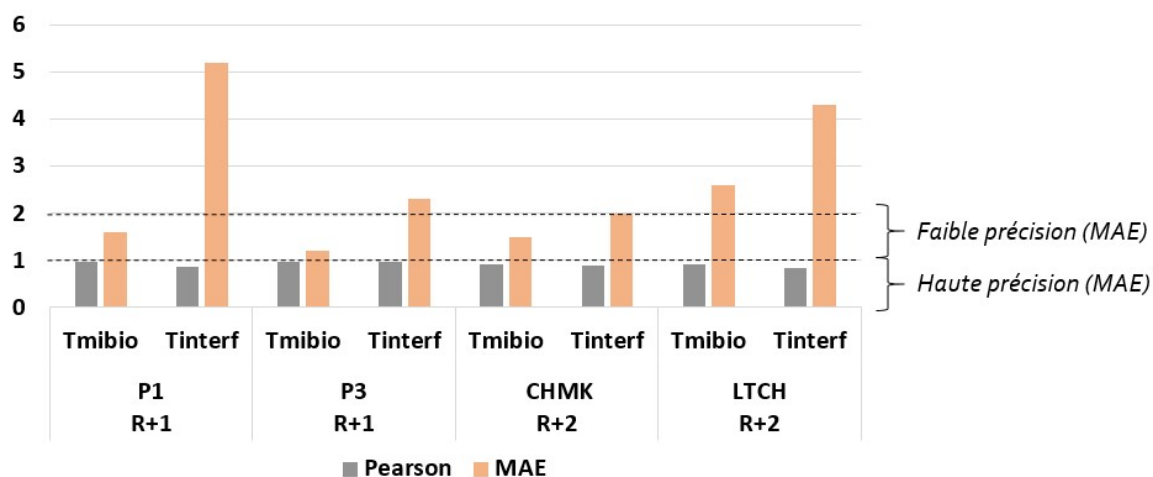


Figure 132 - Coefficient de Pearson et MAE des données de température aux différents emplacements étudiés.

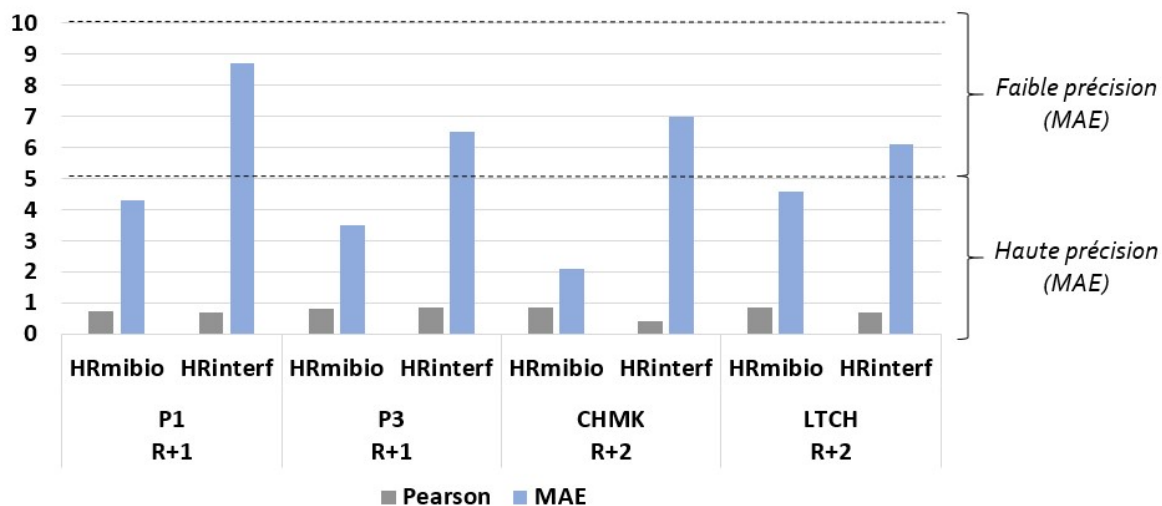


Figure 133 - Coefficient de Pearson et MAE des données d'humidité relative aux différents emplacements étudiés.

Même si les modèles présentés ne génèrent pas des coefficients de corrélation élevés, les allures des courbes et les ordres de grandeur des valeurs simulées semblent intéressants. Comme dit précédemment, les modèles hygrothermiques ne sont pas exempts d'amélioration. Dans la suite nous menons une discussion par rapport aux possibilités d'amélioration du modèle.

### 4.3 Recensement des sources d'erreurs

Selon (Busser *et al.*, 2019) les erreurs peuvent être classées sous quatre catégories : 1) les erreurs expérimentales, 2) les erreurs dues aux conditions aux limites, 3) les erreurs dues au modèle et 4) les erreurs dues aux propriétés des matériaux. Il est donc possible d'effectuer un recensement non exhaustif des origines d'erreurs sur les simulations analysées précédemment.

Dans la catégorie 1) rentrent en compte les précisions données par les constructeurs des capteurs d'humidité et de température servant à la comparaison avec les résultats simulés (les sondes Honeywell ont une précision constructeur de  $\pm 3,5\%$  HR et  $\pm 0,4^\circ\text{C}$ ), mais également la précision des capteurs ayant fourni des mesures utilisées en entrée du logiciel comme les capteurs KIMO® ( $\pm 2\%$  HR et  $\pm 0,44^\circ\text{C}$ ). Dans cette catégorie sont également à prendre en compte l'erreur sur le placement des capteurs. Il est en effet difficile d'évaluer parfaitement la position des capteurs Honeywell dans le mur.

La catégorie 2) regroupe la méthode de prise en compte du rayonnement solaire, qui semble sous-estimer le rayonnement reçu dans un premier temps puis le surestimer comme constaté sur la Figure 124 par exemple et les flux d'humidité et de chaleur aux limites évalués à l'aide de coefficients normatifs comme discuté en 4.1.5. L'influence du vent a également jusqu'ici été négligée à part pour estimer la quantité de pluie battante, qui est également un phénomène considéré assez grossièrement par le logiciel. De plus, le coefficient d'absorption du rayonnement solaire de la paroi extérieure n'a pas pu être déterminé avec précision.

La catégorie 3) comprend les erreurs provenant des hypothèses sur les phénomènes physiques considérées par le modèle et les erreurs dues à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles les caractérisant. Ici on peut citer le fait que les transferts d'air dans les parois et l'hystérésis n'aient pas été pris en compte, par exemple. Elle considère aussi les erreurs dues au logiciel EnergyPlus lors de la simulation du rayonnement solaire incident aux parois et les données obtenues d'une station météorologique qui ne se situe pas exactement sur place.

Enfin la catégorie 4) comprend les erreurs dues au modèle de sorption adopté évaluant mal le comportement du matériau pour des humidités relatives très faibles et très élevées, mais également les erreurs accumulées lors de la détermination en laboratoire des caractéristiques des matériaux, le fait que les briques évaluées ne sont pas forcément représentatives de celles constituant la paroi étudiée ou encore la forte hétérogénéité des matériaux.

De plus, on peut ajouter les conditions initiales du modèle. Nous avons considéré une teneur en humidité moyenne par matériau au lieu d'une teneur par maille, ce qui aurait pu améliorer la prise en compte de la distribution d'eau apportée par le mortier colle.

En conclusion, nous venons de voir que les sources d'erreurs sont nombreuses, et qu'il est extrêmement compliqué d'en effectuer une estimation quantitative.

## 4.4 Conclusions

L'étude bibliographique des propriétés physiques du béton de chanvre a permis de mettre en avant l'intérêt de ce matériau pour les rénovations hygrothermiques de bâtiments anciens. Le travail bibliographique sur les transferts couplés de chaleur et d'humidité ont rendu possible une compréhension globale des phénomènes mis en œuvre dans les simulations.

Ainsi, ce travail bibliographique sur les limites des modèles hygrothermiques a permis de prendre du recul sur le sujet et d'effectuer une analyse lucide des résultats de simulations. Les simulations hygrothermiques présentées ont montré quelques limites dans la description du cas étudié de parois anciennes rénovées avec des matériaux biosourcés hygroscopiques, notamment du fait qu'elles sont considérées avec des conditions aux limites réelles.

Une simulation a été mise en place pour les parois de chaque pièce instrumentée à Cahors. La simulation de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans des parois anciennes a été réalisée à l'aide du logiciel Delphin. Des indices statistiques ont été utilisés pour caractériser l'adéquation entre les résultats mesurés et les résultats simulés.

Les écarts à l'interface, plus importants que ceux au cœur du revêtement, mettent en évidence la forte influence des conditions aux limites à l'extérieur sur la précision du modèle. Les simulations permettent toutefois de prédire un comportement hygrothermique approché des parois avec un niveau de précision satisfaisant pour des analyses globales d'efficacité des solutions de rénovation.

D'autres sources d'erreurs sont relevées et la difficulté d'utiliser des données *in-situ* pour les simulations est constatée. Des variations sont proposées afin d'améliorer les performances des modèles saisis. Une étude paramétrique permettrait de quantifier l'impact de la modification de certains paramètres sur les résultats de la simulation.



## CONCLUSIONS GENERALES

Ce travail de thèse présente une contribution au développement de solutions écologiques de rénovation par l'intérieur du bâti ancien à enjeu patrimonial.

Au Chapitre 1 nous avons souligné les avantages de l'utilisation de matériaux biosourcés au niveau du développement durable. Les propriétés thermohydriques, mécaniques, physiques ainsi que celles liées à la durabilité ont été présentées. La structure poreuse et les transferts de chaleur et de masse au sein du béton de chanvre ont été mis en avant. Ce sont ces caractéristiques et propriétés qui attribuent le pouvoir de régulateur thermohydrique et qui font l'intérêt de son utilisation en rénovation du bâti ancien.

Au Chapitre 2, deux formulations à base de chaux hydraulique permettant l'équilibre entre la résistance mécanique et les propriétés thermohydriques des plaques ont été proposées, une plus classique avec métakaolin (CHMK) et l'autre plus innovante avec laitier (LTCH), les deux incorporant un adjuvant réducteur d'eau. Les résistances mécaniques obtenues avec vibrocompactage du béton de chanvre ont atteint 1,5 MPa pour les deux liants utilisés avec des meilleurs résultats pour le liant LTCH.

La compatibilité avec le bâti ancien et l'efficacité en tant qu'isolant du matériau biosourcé ont ensuite été évaluées à l'aide de différents outils aussi bien expérimentaux (au niveau des matériaux, présentés au Chapitre 2, et au niveau de la paroi, présentés au Chapitre 3) que numériques (présentés au Chapitre 4).

A l'échelle du matériau, les propriétés de tampon hydrique, perméabilité à la vapeur d'eau, absorption d'eau par capillarité et les isothermes de sorption ont été déterminées ainsi que l'évolution de la conductivité thermique en fonction des variations d'humidité relative a été mesurée. Cette analyse a mis en avant l'avantage des mélanges en CHMK par rapport aux mélanges en LTCH, les écarts de comportement pouvant s'expliquer par les différences des matrices liantes (masses volumiques, porosité, *etc.*).

La mise en place, complexe, d'un banc d'essais *in-situ* a permis d'évaluer la performance hygrothermique des plaques en conditions réelles, en complément des conditions de laboratoire.

En ce qui concerne le comportement thermique, nous avons d'abord étudié les phénomènes statiques. Le coefficient de transmission thermique (valeur  $U$ ) est de l'ordre de  $0,7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  (obtenue par la méthode fluxmétrique).

Dans un deuxième temps nous avons analysé le comportement thermique de la paroi sous des sollicitations dynamiques. Le déphasage et l'amortissement augmentent considérablement en comparaison avec la paroi nue et même en comparaison avec une isolation classique à la fin du siècle dernier en polystyrène et plâtre.

Le comportement hydrique a été analysé en fonction de la réponse dynamique de la paroi lors d'une campagne d'humidification. L'évolution des températures et humidités à l'intérieur et à l'extérieur des pièces a été présenté en fonction du temps, mais aussi sous forme de profils instantanés. L'analyse de l'inertie hydrique des parois conclut que le comportement hydrique des échantillons mis en place pour les deux types de liants est aussi équivalent (de l'ordre de 10 jours).

Ainsi, cette analyse *in-situ* a montré que le comportement des deux mélanges testés était assez similaire.

Le modèle numérique développé a permis de valider la performance hygrothermique de la paroi après isolation avec un niveau de précision considéré satisfaisant pour des analyses d'efficacité des solutions de rénovation et des risques liés à la condensation au niveau de la paroi.

La comparaison entre les valeurs simulées et mesurées a mis en évidence une forte influence des conditions aux limites extérieures sur les mesures *in-situ*, mais aussi dans les simulations. La morphologie urbaine des centres anciens et le type de construction (bâti du 13<sup>ème</sup> siècle) influent de façon importante sur les conditions aux limites à l'extérieur du bâtiment et leurs effets, ce qui rend l'analyse et l'interprétation des résultats difficile, notamment pour la comparaison entre les différentes configurations et à différentes échéances temporelles. Un recensement des sources d'erreur a été effectué et des suggestions d'amélioration du modèle selon différents niveaux sont présentées.

Ainsi, après les études en laboratoire et sur site, expérimentales et numériques, on peut dire que les matériaux biosourcés présentés, formulés à partir de liants bas carbone innovants, constituent une solution viable et prometteuse pour améliorer la performance énergétique des

bâtiments historiques et réduire l’empreinte carbone du secteur de la construction en phase de rénovation (construction) ou d’usage.



## PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Dans cette partie nous présentons les perspectives de ce travail de thèse par axe de recherche mené.

### Développement et caractérisation des matériaux

Au niveau du développement de liants bas carbone alternatifs pour répondre à la problématique du développement durable, le liant composé de métakaolin et chaux hydraulique naturelle s'est présenté comme une potentielle solution pour la rénovation du bâti ancien. L'étude basée sur l'optimisation de différents mélanges en présence de nouveaux adjuvants est prometteuse. L'analyse des matériaux alcali-activés par des solutions alcalines à empreinte carbone réduite peut aussi être intéressante. Dans les deux cas, il serait nécessaire de réaliser une analyse du cycle de vie des produits finis afin de garantir le caractère « éco » de ces nouveaux matériaux.

Au niveau de la caractérisation des propriétés hydriques des matériaux biosourcés, les analyses menées se basent sur des méthodes en régime permanent. Le développement de méthodes permettant une évaluation en régime non-stationnaire, plus représentative du comportement réel, pourrait conduire à l'obtention de paramètres plus précis.

Concernant les interactions entre les extraits solubles de la chènevotte, le liant et l'adjuvant, une caractérisation microstructurale plus poussée menée à différentes échéances s'avèrerait intéressante. Il conviendrait certainement d'utiliser cette approche pour rechercher l'adjuvant le plus performant en présence d'extraits solubles.

### Instrumentation *in-situ*

Dans un premier temps, il serait intéressant de monitorer la paroi au R+2 pendant une année complète pour quantifier l'apport d'humidité liée à la mise en oeuvre des plaques préfabriquées avec le mortier colle. Cela permettrait d'avoir une idée du temps de séchage de la paroi.

La mise en place d'un banc expérimental *in-situ* a confirmé la forte influence des conditions aux limites extérieures sur le comportement de la paroi. L'utilisation de méthodes permettant l'évaluation *in-situ* dans des conditions maîtrisées, comme le *hot box* par exemple, présente l'avantage de garder les caractéristiques réelles des parois historiques et de contrôler les

conditions aux limites intérieures et extérieures. Ou encore, l'utilisation de thermographie infrarouge quantitative pourrait mieux représenter le comportement *in-situ* des façades rénovées.

De plus, il conviendrait de faire une analyse des comportements hygrothermiques en conditions plus réalistes d'occupation du bâtiment, en faisant plus varier les taux d'humidité et la ventilation par exemple.

### Modélisation et simulation numérique

Le modèle présenté est capable de représenter le comportement des bâtiments avec un niveau de précision satisfaisant pour des applications concrètes. Cependant, un niveau de précision plus important peut toujours être envisagé pour des approches plus scientifiques. Les possibilités d'amélioration sont nombreuses et constituent elle mêmes des perspectives de recherche.

Par exemple, au niveau des matériaux, l'enduit ciment fréquemment présent sur les façades extérieures voire intérieures pour certaines parois à pan de bois à Cahors, n'est pas représenté dans le modèle. Il serait donc intéressant de compléter l'étude en prenant en compte l'influence de cet enduit ciment sur les transferts hygrothermiques.

Les transferts de vapeur d'eau par advection à travers la paroi sont également négligés dans cette étude. Or ce phénomène peut être pris en compte par le logiciel Delphin. Des nouvelles simulations permettraient d'étudier l'influence du transfert par advection lors de la mise en place de matériaux très perméables tels que les isolants biosourcés.

Une étude paramétrique permettrait aussi de quantifier l'impact sur les résultats de la simulation lors de la modification de certains paramètres. Enfin, effectuer la simulation pour une année complète pour le R+2 serait plus représentatif du comportement des parois en différentes conditions climatiques.

## REFERENCES

- Abdul Hamid, A. et Wallentén, P. (2017). Hygrothermal assessment of internally added thermal insulation on external brick walls in Swedish multifamily buildings. *Building and Environment*, 123, 351-362. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.019>
- AFNOR. (2006). ISO 14040 : Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- AFNOR. (2008). NF EN 15026 : Evaluation du transfert d'humidité par simulation numérique.
- AFNOR. NF EN ISO 10456 : Matériaux et produits pour le bâtiment - Propriétés hygrothermiques (2008).
- AFNOR. (2016). ISO 12572 : Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau -Méthode de la coupelle.
- AFNOR. (2016). NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances.
- AFNOR. (2017). NF P18-452 : Bétons - Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers au maniabilimètre.
- AFNOR. (2019). NF EN 12390-3 : Essais pour béton durci - Partie 3 ; Résistance à la compression des éprouvettes.
- AFNOR. (2021). ISO 12571 : Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique.
- Agopyan, V., Savastano, H., John, V. M. et Cincotto, M. A. (2005). Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 527-536. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.004>
- Amziane, S. et Arnaud, L. (2013). *Les bétons de granulats d'origine végétale : application aux bétons de chanvre*. Lavoisier.
- Amziane, S. et Sonebi, M. (2016). Overview on biobased building material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters*, 1, 31-38.
- Aouba, L. (2015). *Caractérisation et conception de nouveaux matériaux et produits à base de terre cuite et d'agro-ressources*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- Arehart, J. H., Nelson, W. S. et Srubar, W. V. (2020). On the theoretical carbon storage and carbon sequestration potential of hempcrete. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121846>
- Arfvidsson, J. (1999). A New Algorithm to Calculate the Isothermal Moisture Penetration for Periodically Varying Relative Humidity at the Boundary. *Nordic Journal of Building Physics*, 2, 11.
- Arfvidsson, J., Bjelke-Holtermann, B. et Mattsson, J. (2017). Status determination of a historical building including measures for three different scenarios. *Energy Procedia*,

- 132, 939-944. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.730>
- Arnaud, L. et Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- Arrigoni, A., Pelosato, R., Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S. et Dotelli, G. (2017). Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1051-1061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>
- Asli, M., Brachelet, F., Sassine, E. et Antczak, E. (2021). Thermal and hygroscopic study of hemp concrete in real ambient conditions. *Journal of Building Engineering*, 44(April 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102612>
- Association InterChanvre. (2020). *Le chanvre : une culture « verte » incroyable*. Disponible sur : [https://www.interchanvre.org/documents/1.Interchanvre/202005\\_PPT\\_Le%20Chanvre.pdf](https://www.interchanvre.org/documents/1.Interchanvre/202005_PPT_Le%20Chanvre.pdf).
- Bakolas, A., Aggelakopoulou, E., Moropoulou, A. et Anagnostopoulou, S. (2006). Evaluation of pozzolanic activity and physicomechanical characteristics in metakaolin-lime pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 84(1), 157-163. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-7262-y>
- Bienvenido-Huertas, D., Rodríguez-Álvaro, R., Moyano, J. J., Rico, F. et Marín, D. (2018). Determining the U-Value of façades using the thermometric method: Potentials and limitations. *Energies*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/en11020360>
- Bookin, A. S. et Drits, V. A. (1993). Polytype diversity of the hydrotalcite-like minerals I. possible polytypes and their diffraction features. *Clays and Clay Minerals*, 41(5), 551-557. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1993.0410504>
- Bouloc, P. (2006). *Le chanvre industriel : production et utilisations* (France Agr).
- Boumediene, N., Collet, F., Prétot, S. et Elaoud, S. (2022). Hygrothermal Behavior of a Washing Fines-Hemp Wall under French and Tunisian Summer Climates: Experimental and Numerical Approach. *Materials*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/ma15031103>
- BSI. ISO 15148: Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion (2003).
- BSI. (2014). ISO 9869-1:2014 - Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance; Part 1: Heat flow meter method, 48.
- BSI. ISO 6946:2017 - Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation method. , Iso (2017). [www.iso.org](http://www.iso.org)
- BSI. ISO 7345: 2018 - Thermal Performance of buildings and building components - Physical quantities and definitions (2018).
- Bucher, R. (2015). *Vers une utilisation rationnelle des métakaolins flash : application aux bétons*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Bumanis, G., Vitola, L., Pundiene, I. et Sinka, M. (2020). Gypsum , Geopolymers , and Starch — Alternative Binders for Bio-Based Building Materials : A Review and Life-Cycle Assessment.

- Busser, T., Berger, J., Piot, A., Pailha, M. et Woloszyn, M. (2019). Comparison of model numerical predictions of heat and moisture transfer in porous media with experimental observations at material and wall scales: An analysis of recent trends. *Drying Technology*, 37(11), 1363-1395. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1502195>
- Cassagnabère, F., Escadeillas, G. et Mouret, M. (2009). Study of the reactivity of cement/metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 775-784. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.022>
- Cérézo, V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. *Thèse doctorale*, 247. <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2005isal0037/these.pdf>
- Claude, S. (2018). Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les écomatériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, (October), 166.
- Claude, S., Ginestet, S., Bonhomme, M., Moulène, N. et Escadeillas, G. (2017). The Living Lab methodology for complex environments: Insights from the thermal refurbishment of a historical district in the city of Cahors, France. *Energy Research and Social Science*, 32, 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.01.018>
- Collet, F. (2004). *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes.
- Collet, F., Bart, M., Serres, L. et Miriel, J. (2008). Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1271-1280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.018>
- Collet, F. et Pretot, S. (2012). Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 36, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139>
- Collet, F. et Pretot, S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*, 65, 612-619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>
- Construire en chanvre. (2012). *Règles professionnelles d'exécution*. SEBTP. [www.construire-en-chanvre.fr](http://www.construire-en-chanvre.fr)
- D'Almeida, A. L. F. S., Melo Filho, J. A. et Toledo Filho, R. D. (2009). Use of curaua fibers as reinforcement in cement composites. *Chemical Engineering Transactions*, 17, 1717-1722. <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer Cement a review. *Geopolymer Science and Technics*, 1-11.
- Dornelles, K., Roriz, V. et Roriz, M. (2007). *Determination of the solar absorptance of opaque surfaces* (p. 452-459). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2368.1764>
- Ecocem. (2022). *Le laitier moulu Ecocem est un liant hydraulique bas carbone*. <https://ecocem.fr/produits/laitier-moulu/>
- Elfordy, S., Lucas, F., Tancrèt, F., Scudeller, Y. et Goudet, L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (« hempcrete ») manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2116-2123.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>

- European Commission. (2021a). *COM (2021) 802 final : Proposition de directive du parlement européen et du conseil sur la performance énergétique des bâtiments (refonte)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021PC0802&from=EN>
- European Commission. (2021b). *Factsheet: Making our homes and buildings fit for a greener future*. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en)
- Evrard, A. (2008). *Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials*. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain.
- Fatre, N. (2013). Béton cellulaire autoclavé dans la construction. *Techniques de l'ingénieur*. 33(0). <https://doi.org/10.51257/a-v1-c2219>.
- Fauconnier, R. (1992). L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires. *Chauffage Ventilation Conditionnement*.
- Frías, M. et Cabrera, J. (2001). Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C. *Cement and Concrete Research*, 31(4), 519-527. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00465-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00465-8)
- Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to « low-CO<sub>2</sub> » cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489-1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
- Gourlay, E., Glé, P., Marceau, S., Foy, C. et Moscardelli, S. (2017). Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 139, 513-523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.018>
- Gram, H.-E. (1983). *Durability of natural fibres in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Institute of Technology. ISSN 0346-6906. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139176170.010>
- Haha, M. Ben, Lothenbach, B., Le Saout, G. et Winnefeld, F. (2011). Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag - Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 955-963. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.002>
- Heeren, N., Mutel, C. L., Steubing, B., Ostermeyer, Y., Wallbaum, H. et Hellweg, S. (2015). Environmental Impact of Buildings - What Matters? *Environmental Science and Technology*, 49(16), 9832-9841. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01735>
- Hens, H. (2002). Heat, Air and Moisture Transfer in Highly Insulated Building Envelopes (HAMTIE). *IEA ECBCS Annex 24*.
- Huerto-Cardenas, H. E., Leonforte, F., Aste, N., Del Pero, C., Evola, G., Costanzo, V. et Lucchi, E. (2020). Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: State of the art, research challenges and recommendations. *Building and Environment*, 180(March), 107081. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107081>
- Hussain, A., Calabria-Holley, J., Lawrence, M. et Jiang, Y. (2019). Hygrothermal and mechanical characterisation of novel hemp shiv based thermal insulation composites. *Construction and Building Materials*, 212, 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.029>
- Hustache, Y. et Arnaud, L. (2008). *Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre*. Rapport, Association Construire en Chanvre.

- Ip, K. et Miller, A. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001>
- John, V. M., Cincotto, M. A., Sjöström, C., Agopyan, V. et Oliveira, C. T. A. (2005). Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 565-574. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.007>
- Khazma, M., Goullieux, A., Dheilily, R. M. et Quéneudec, M. (2012). Coating of a lignocellulosic aggregate with pectin/polyethylenimin mixtures: Effects on flax shive and cement-shive composite properties. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.008>
- Kim, M. S., Jun, Y., Lee, C. et Oh, J. E. (2013). Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 54, 208-214. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.011>
- Korde, C., Cruickshank, M. et West, R. P. (2021). Activation of slag: A comparative study of cement, lime, calcium sulfate, GGBS fineness and temperature. *Magazine of Concrete Research*, 73(1), 15-31. <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00119>
- Krejsová, J. et Doleželová, M. (2019). Resistance of mortars with gypsum, lime and composite binders against molds. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 21, 16-20. <https://doi.org/10.14311/APP.2019.21.0016>
- Künzel, H. M. (1995). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Fraunhofer Institute of Building Physics.
- Labat, M., Magniont, C., Oudhof, N. et Aubert, J. E. (2016). From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. *Building and Environment*, 97, 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.004>
- Labat, M., Woloszyn, M., Garnier, G. et Roux, J. J. (2015). Dynamic coupling between vapour and heat transfer in wall assemblies: Analysis of measurements achieved under real climate. *Building and Environment*, 87, 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.022>
- Lagouin, M. (2020). *Caractérisation et optimisation multiphysiques d'une paroi bicouche bio et géosourcée*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Lau Hiu Hoong, J. D. (2017). *Research of new binders and/or new methods to improve the mechanical performance of bio-based concretes*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- Lawrence, M., Shea, A., Walker, P. et de Wilde, P. (2013). *Hygrothermal performance of bio-based insulation materials* (vol. 166, p. 257-263). <https://doi.org/10.1680/coma.12.00031>
- Liu, L. F., Li, H. Q., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C. Y., Liu, Q. Bin et Li, N. P. (2017). The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(October 2016), 912-932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140>
- Magniont, C. (2010). *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier.

- Magniont, C., Escadeillas, G., Coutand, M. et Oms-Multon, C. (2012). Use of plant aggregates in building ecomaterials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452>
- Malagoni, M., Gallego, S., Ginestet, S. et Escadeillas, G. (2021). *Réflexions sur l'utilisation de capteurs de densité de flux thermique sur un banc expérimental in-situ*. Actes du congrès annuel de la société française de thermique (p. 311-318). Belfort, 2021.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. et (eds.), T. W. (2018). *IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of cli.* [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15\\_Full\\_Report\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf)
- McCarthy, M. J. et Dyer, T. D. (2019). Pozzolanas and Pozzolanic Materials. Dans P. C. Hewlett et M. Liska (dir.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (Fifth Edit). Elsevier Ltd.
- McGregor, F., Heath, A., Fodde, E. et Shea, A. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment*, 75, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.009>
- Mohr, B. J., Biernacki, J. J. et Kurtis, K. E. (2007). Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites. *Cement and Concrete Research*, 37(11), 1531-1543. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.001>
- Moujalled, B., Aït Ouméziane, Y., Moissette, S., Bart, M., Lanos, C. et Samri, D. (2018). Experimental and numerical evaluation of the hygrothermal performance of a hemp lime concrete building: A long term case study. *Building and Environment*, 136(December 2017), 11-27. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.025>
- Murray, F. W. (1997). On the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 6, 203-204.
- Nguyen, T. (2010). *Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud.
- Nguyen, T., Picandet, V., Amziane, S. et Baley, C. (2009). Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 37-41. <https://doi.org/10.1080/19648189.2009.9693171>
- Nguyen, T., Picandet, V., Carre, P., Lecompte, T., Amziane, S. et Baley, C. (2014). Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (December 2014), 37-41. <https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693246>
- Nicolai, A. (2007). *Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials*. Thèse de doctorat, University of Technology Dresden, Germany, 2002.
- Niyigena, C., Amziane, S., Chateauneuf, A., Arnaud, L., Bessette, L., Collet, F., Lanos, C.,

- Escadeillas, G., Lawrence, M., Magniont, C., Marceau, S., Pavia, S., Peter, U., Picandet, V., Sonebi, M. et Walker, P. (2016). Variability of the mechanical properties of hemp concrete. *Materials Today Communications*, 7, 122-133.  
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>
- Nozahic, V. (2012). *Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal : application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00822142>
- Nozahic, V., Amziane, S., Torrent, G., Saïdi, K. et De Baynast, H. (2012). Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder. *Cement and Concrete Composites*, 34, 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>
- Pacheco-Torgal, F. et Jalali, S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, 25(2), 575-581.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>
- Padfield, T. (1998). *The Role of Absorbent Building Materials in Moderating Changes of Relative Humidity*. Ph.D thesis, Department of Structural Engineering and Materials, The Technical University of Denmark.
- Peuhkuri, R. (2003). *Moisture Dynamics in Building Envelopes*. Technical University of Denmark. Ph.D Thesis. Report R-071. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2003.
- Peyratout, C., Le Troëdec, M., Chotard, T., Bonnet, J. P. et Smith, A. (2007). Modifications physico-chimiques des interactions entre les fibres de chanvre et la chaux : impacts sur les propriétés mécaniques des mortiers. *18ème Congrès Français de Mécanique*.  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC334765/%5Cnhttp://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC334765/%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Modifications+physico-chimiques+des+interactions+entre+les+fibr+de+chanvre+et+la+chau>
- Pierre, T. et Colinart, T. (2011). *Caractérisation thermohydrrique d'agromatériaux à base de chanvre* (p. 24-27). Actes du congrès annuel de la société française de thermique, 2011.
- Pimentel, L. L., Beraldo, A. L. et Savastano, H. (2006). Durability of cellulose-cement composites modified by polymer. *Engenharia Agricola*, 26(2), 344-353.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000200002>
- Piot, A. (2009). *Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique*. Thèse de doctorat, Sciences de l'ingénieur [physics]. INSA de Lyon, 2009. Français. tel-00440510.
- Pouhet, R. (2015). *Formulation and durability of metakaolin-based geopolymers*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier. <http://oatao.univ-toulouse.fr/9278/>
- Pretot, S., Collet, F. et Garnier, C. (2014). Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment*, 72, 223-231.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.010>
- Proquez, V. (2021). *Simulations numériques des échanges de chaleur et de masse dans des murs anciens rénovés au béton de chanvre avec le logiciel Delphin*. Rapport de stage, INSA de Toulouse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions, 2021.
- Provis, J. L. (2014). Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what?

- Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(1-2), 11-25.  
<https://doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5>
- Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A. D., Promis, G. et Langlet, T. (2017). Experimental investigation of hygrothermal behavior of two bio-based building envelopes. *Energy and Buildings*, 139, 608-615. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.058>
- Ratiarisoa, R. V., Magniont, C., Ginestet, S., Oms, C. et Escadeillas, G. (2016). Assessment of distilled lavender stalks as bioaggregate for building materials: Hygrothermal properties, mechanical performance and chemical interactions with mineral pozzolanic binder. *Construction and Building Materials*, 124, 801-815.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.011>
- Rhee-Duverne, S. et Baker, P. (2013). Research into the thermal performance of traditional brick walls. *English Heritage Research Report*, 34.  
<https://research.historicengland.org.uk/Report.aspx?i=15741> (Accessed: 01.November 2020)
- RILEM TC 244-AAM. (2014). *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report* (édité par J. S. J. Provis, John L.; van Deventer). Springer.
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T. et Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings - The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258(June 2019), 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- Rode, C. (Ed.) (2005), Peuhkuri, R. H., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Arfvidsson, J., & Harderup, L-E. (2005). *Moisture Buffering of Building Materials*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. BYG Report No. R-127, 2005.
- Rojas, M. F. et Sánchez de Rojas, M. I. (2003). The effect of high curing temperature on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement matrices at 60 °C. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 643-649. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01040-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01040-2)
- Rye, C. et Scott, C. (2012). *The SPAB research report 1 : U-value report*.
- Sabir, B., Wild, S. et Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 441-454.  
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Samri, D. (2008). *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- San Nicolas, R. (2012). *Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011. Français. tel-00756481.
- Scheffler, G. (2008). *Validation of hygrothermal material modeling under consideration of the hysteresis of moisture storage*. Thèse de doctorat, Dresden University of Technology.
- Sedan, D. (2007). *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite*. Thèse doctorale, Université de Limoge.
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A. et Chotard, T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European*

- Ceramic Society*, 28, 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019>
- Seng, B. (2018). *Etude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique de blocs préfabriqués en béton de chanvre*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier. <http://oatao.univ-toulouse.fr/9278/>
- Seo, J., Kim, S., Park, S., Bae, S. J. et Lee, H. K. (2021). Microstructural evolution and carbonation behavior of lime-slag binary binders. *Cement and Concrete Composites*, 119(March 2020), 104000. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104000>
- Shea, A., Lawrence, M. et Walker, P. (2012). Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building. *Construction and Building Materials*, 36, 270-275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123>
- Sitarz, M., Urban, M. et Hager, I. (2020). Rheology and mechanical properties of fly ash-based geopolymer mortars with ground granulated blast furnace slag addition. *Energies*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/en13102639>
- Sites & Cités remarquables de France. (2019). *Retours d'expériences - Cahors, Porto, victoria-Gasteiz: Projet ENERPAT-SUDOE*.
- Sontag, L., Nicolai, A. et Vogelsang, S. (2013). Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin, 1-80. <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/12896/DelphinValidierung.pdf>
- Teni, M., Krstić, H. et Kosiński, P. (2019). Review and comparison of current experimental approaches for in-situ measurements of building walls thermal transmittance. *Energy and Buildings*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109417>
- The Manh, D. (2014). *Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier
- Tonoli, G. H. D., Santos, S. F., Joaquim, A. P. et Savastano, H. (2010). Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. *Construction and Building Materials*, 24(2), 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.018>
- Ubbriaco, P. et Tasselli, F. (1998). A study of the Hydration of lime-pozzolan binders. *Journal of Thermal Analysis*.
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P. et Brice, D. G. (2010). Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. *Waste and Biomass Valorization*, 1(1), 145-155. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9015-9>
- Verbeke, S. et Audenaert, A. (2018). Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(September 2017), 2300-2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>
- Vogelsang, S., Fechner, H. et Nicolai, A. (2013). Delphin 6 Material File Specification, Version 6.0.
- Walker, R. et Pavía, S. (2014). Effect of hemp's soluble components on the physical properties of hemp concrete. *Journal of Materials Science Research*, 3(3), 12-23. <https://doi.org/10.5539/jmsr.v3n3p12>
- Webb, A. L. (2017). Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(April 2016), 748-759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>

- Yang, K. H., Cho, A. R., Song, J. K. et Nam, S. H. (2012). Hydration products and strength development of calcium hydroxide-based alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, 29, 410-419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.063>

## Annexe

Article publié aux actes du Congrès français de thermique - SFT 2021.

# Réflexions sur l'utilisation de capteurs de densité de flux thermique sur un banc expérimental *in-situ*.

## Considerations about the use of heat flux sensors in a *in-situ* experimental bench.

Marina MALAGONI<sup>1\*</sup>, Sandra GALLEGGO<sup>2</sup>, Stéphane GINESTET<sup>2</sup>, Gilles ESCADEILLAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Goiás

Avenida Assis Chateaubriand, n° 1.658, Setor Oeste. 74130-012 - Goiânia, Goiás, Brasil.

<sup>2</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions – LMDC

135 Avenue de Rangueil, 31400 Toulouse.

\*(auteur correspondant : [malagoni@insa-toulouse.fr](mailto:malagoni@insa-toulouse.fr))

**Résumé** – ce travail s'intéresse à des problèmes soulevés sur des fluxmètres pendant la mise en place d'un banc d'essais pour monitorer *in-situ* des façades d'un bâtiment ancien avant et après rénovation, afin d'appréhender le comportement thermo-hydrique de ces parois. Nous présentons un nouveau type de fluxmètre perforé qui serait plus adapté pour des parois respirantes sur des bâtiments anciens et nous menons une réflexion sur le facteur de sensibilité : son étalonnage, sa probable dérive dans le temps, l'incertitude associée et la résistance du câblage électrique.

**Mots-clés** : Monitoring *in-situ* ; Fluxmètres ; Métrologie ; Etalonnage ; Sensibilité.

**Abstract** – this work is interested in problems raised on flowmeters during the installation of a test bench to monitor *in-situ* the facades of an old building before and after renovation, in order to understand the thermo-hydric behaviour of its walls. We present a new type of perforated flowmeter that would be more suitable for breathable walls on old buildings and we reflect on the sensitivity factor: its calibration, probable drift over time, the associated uncertainty and the resistance of the electrical wiring.

**Keywords**: *In-situ* monitoring; Heat flux sensors; Metrology; Calibration; Sensitivity.

### Nomenclature

$S$  sensibilité,  $V/(W/m^2)$   
 $q$  densité de flux de chaleur,  $W/m^2$   
 $L$  épaisseur échantillon, m  
 $E$  tension de sortie, V  
 $\Delta T$  écart de température, °C  
 $u$  incertitude  
 $u_c$  incertitude standard combinée

$T$  température, °C  
*Symboles grecs*  
 $\lambda$  conductivité thermique,  $W/(m.K)$   
*Indices et exposants*  
 $f$  mesuré avec fluxmètre  
 $\lambda$  mesuré avec lambdamètre

## 1. Introduction

La littérature est riche en travaux comparant les propriétés thermo-physiques mesurées *in-situ* et les simulations numériques décrivant le comportement thermique de murs modernes, anciens et rénovés à l'aide de différents matériaux [1]–[3]. Cependant, on constate aussi un écart entre les valeurs déterminées sur site en conditions réelles et les valeurs théoriques, souvent attribué à la variabilité des propriétés des matériaux et aux modèles de transfert de chaleur et de masse et généralement corrigé avec des coefficients multiplicateurs (type « offset ») [4].

On observe aussi un manque d'informations sur la méthodologie de mise en place des capteurs, notamment en ce qui concerne l'étalonnage, le comportement de la sensibilité dans le temps, la forme du capteur elle-même et les longueurs de câble électrique. Autant de variables qui pourraient aussi être à l'origine de ces écarts.

L'utilisation des capteurs de densité de flux thermique (fluxmètres) implique des contraintes sur plusieurs facteurs. La pose du transducteur sur un mur modifie la résistance thermique locale et fait que le flux de chaleur local peut différer de celui du mur non instrumenté.

De plus, la résistance thermique du capteur étant généralement différente de celle de son environnement immédiat, le flux thermique sur les bords du capteur n'est pas unidimensionnel. Sans mentionner que l'hypothèse de régime permanent est rarement, voire jamais, valable pour des mesures *in-situ* [5]. On voit donc que l'étalonnage de ce type de capteur doit être réalisé au plus près de son cadre d'application.

L'utilisation des fluxmètres *in-situ* demande alors un étalonnage à des niveaux de flux de chaleur et températures cohérents avec les conditions finales d'utilisation [6]. Ce travail se propose donc d'établir un nouveau protocole d'étalonnage des capteurs de densité de flux thermique en le comparant avec la procédure de la norme américaine ASTM C1130.

Nous présentons les analyses de la sensibilité sur des fluxmètres de surface pleine et aussi perforée. Ces derniers seraient plus adaptés pour des parois respirantes sur bâtiments anciens, afin de réduire les perturbations sur le flux thermique [7]. Une étude particulière est aussi menée sur l'influence de la longueur du câble électrique, qui relie les capteurs à la centrale d'acquisition pour la mesure de densité de flux thermique. Une analyse sur l'ampleur et l'importance relative des incertitudes de la sensibilité des fluxmètres sera enfin présentée.

## 2. Matériaux et méthodes

Dans cette partie ; nous présentons les fluxmètres et les équipements utilisés dans cette étude aussi bien que le protocole d'étalonnage des fluxmètres.

### 2.1. Fluxmètres

Les capteurs de densité de flux thermique sont constitués de thermocouples connectés en série et ils correspondent à un transducteur produisant une tension de sortie ( $E$ ) linéairement proportionnelle à la densité de flux thermique locale ( $q$ ). Chaque fluxmètre présente une sensibilité ( $S$ ) d'usine qui correspond à ce coefficient de proportionnalité.

Comme montré par Zarr *et al.* [8], l'ordonnée à l'origine peut être négligée et la forme fonctionnelle présentée sur l'équation 1 est suffisante pour l'étalonnage.

$$E = Sq \quad (1)$$

Avec le temps, les capteurs peuvent s'abîmer et le facteur d'étalonnage peut dériver. Le but de cette procédure est donc de vérifier la validité du facteur d'usine de fluxmètres (l'étude porte sur des fluxmètres sortis d'usine en 2015) et le niveau d'interférence du rallongement des câbles électriques sur la mesure.

La Figure 1 présente les fluxmètres étudiés. Ce sont des capteurs carrés présentant 10 cm de côté et une épaisseur de 0,6 mm fabriqués par la société CAPTEC. Ils sont constitués de 140 thermocouples de type K par  $\text{cm}^2$  et le matériau électriquement isolant du support correspond à de l'époxy et du polyimide. Les deux capteurs pleins sont appelés P1 et P2 et les deux troués T1 et T2. La surface de mesure des capteurs troués est deux fois plus petite que celle des capteurs pleins et le diamètre des trous est de 1,6 cm.

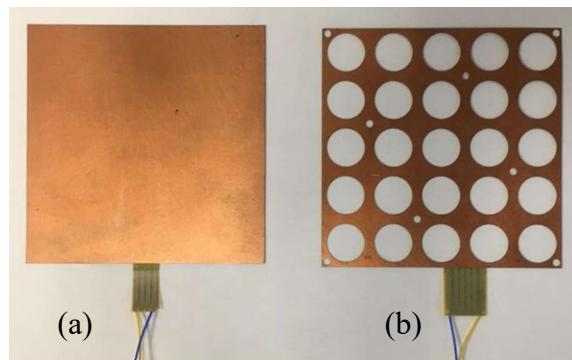


Figure 1 : Typologie des fluxmètres étudiés : (a) plein ; (b) troué.

## 2.2. Equipements

La procédure d'étalonnage consiste à comparer la mesure de la tension de sortie d'un fluxmètre relié à une centrale d'acquisition de données (Centrale Agilent 34907A avec carte d'acquisition 34901A) et la densité de flux thermique obtenue à l'aide d'un appareil de mesure de la conductivité thermique à plaque chaude gardée, appelé lambdamètre ou  $\lambda$ -mètre (Lambda-Meßtechnik GmbH Dresden – EP500). Un aperçu général du banc d'essais est montré sur la Figure 2.

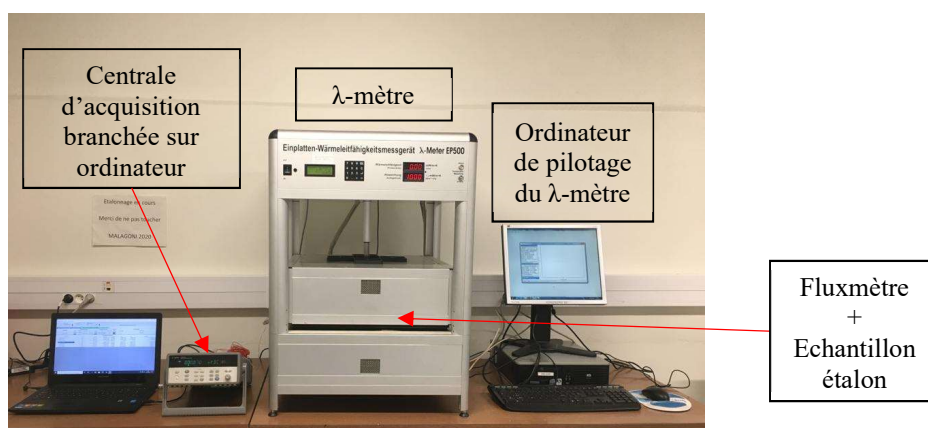


Figure 2 : Configuration du banc d'essais pour l'étalonnage des fluxmètres.

Les mesures avec le lambdamètre ont été effectuées selon la norme ASTM C177 [9] en adaptant l'empilement dans l'équipement avec un échantillon étalon en verre de conductivité thermique égale à  $0,625 \text{ W/m.K}$  et d'épaisseur de 19,4 mm.

Contrairement aux équipements classiques pour l'étalonnage des capteurs thermiques, l'équipement à plaque chaude gardée utilisé ne fournit pas le flux de chaleur. C'est un équipement spécifique pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux d'usage en génie civil et la procédure présentée a été adaptée pour permettre son utilisation.

Nous avons posé un panneau isolant fibreux de haute densité au-dessus de la plaque froide et au centre de cet isolant (percé de 15 x 15 cm) nous avons positionné l'échantillon étalon en verre. Puis au-dessus de ce dernier, nous avons posé le fluxmètre à étalonner. Nous cherchons une configuration simple à mettre en place en laboratoire et plus proche des conditions réelles d'usage de ce capteur *in-situ* comme discuté précédemment. La pression de contrôle est réglée à 1 kN/m<sup>2</sup> à chaque essai. La Figure 3 présente les schémas d'empilement des échantillons dans le lambdamètre pour la configuration préconisée par la norme américaine et celle simplifiée avec l'étalon en verre.

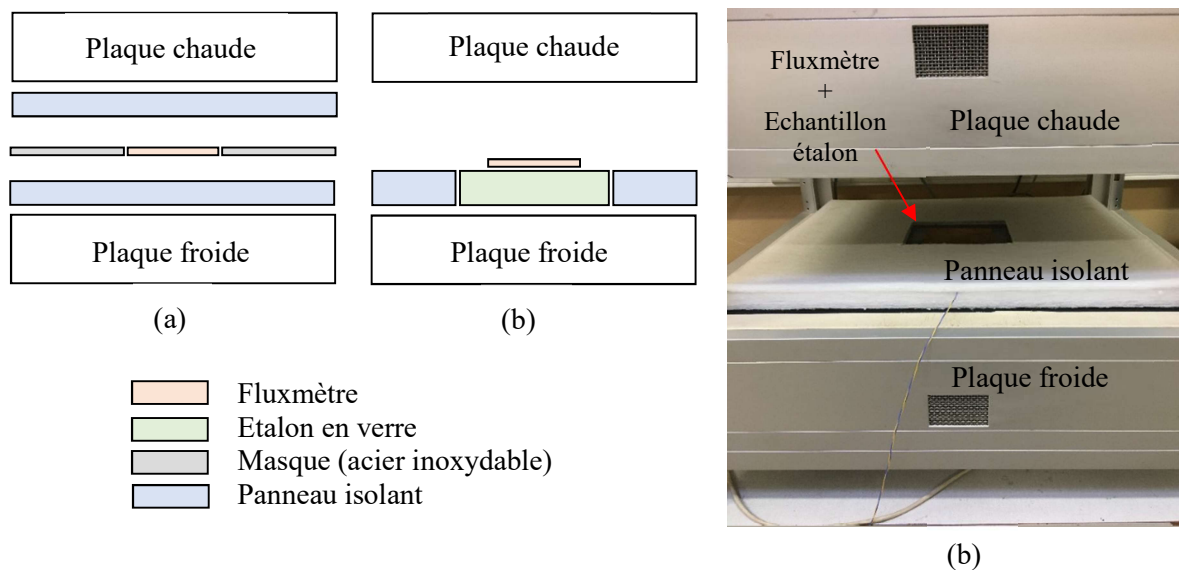


Figure 3 : Empilement dans le lambdamètre : (a) méthode ASTM C1130 ; (b) méthode avec échantillon étalon en verre.

Nous avons pris un soin particulier pour centrer le fluxmètre comme le montre la Figure 4.

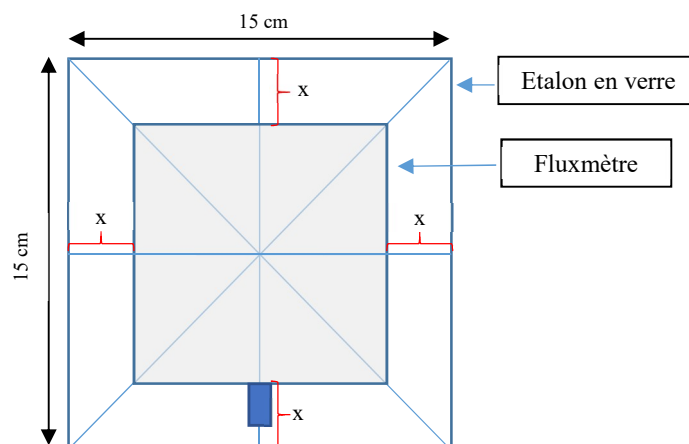


Figure 4 : Positionnement du fluxmètre sur l'échantillon étalon.

A la fin de l'essai, le lambdamètre donne les valeurs de la conductivité thermique ( $\lambda$ ) en fonction du temps. Les capteurs ont été testés à une température moyenne de 20°C et trois

différentes densités de flux thermique ajustées en fonction de la différence de température entre les plaques chaude et froide ( $\Delta T$ ), soit 5, 10 et 15°C. Les températures ont été choisies en fonction des températures moyennes de la ville de Cahors (Lot 46), où les capteurs seront posés et de la capacité du lambdamètre.

### 2.3. Protocole d'étalonnage

Les deux procédures décrites ci-dessus donnent des relevés en fonction du temps. La centrale d'acquisition fournit les valeurs de tension ( $E$ ) et le lambdamètre la conductivité thermique ( $\lambda$ ). Afin de pouvoir comparer les données, il est nécessaire de calculer la densité de flux thermique en régime permanent pour chaque essai.

#### 2.3.1. Calcul de la densité de flux à partir de la mesure de la conductivité thermique

A partir des valeurs de  $\lambda$  obtenues, on peut calculer la densité de flux thermique à travers l'empilement dans le lambdamètre, en utilisant la loi de Fourier ou l'analogie électrique selon l'équation 2, avec l'hypothèse d'un système monodimensionnel.

$$q_\lambda = \lambda \frac{\Delta T}{e} \quad (2)$$

#### 2.3.2. Relevés de la tension de sortie

A partir des valeurs obtenues en régime permanent et en prenant 6 chiffres significatifs, on réalise une moyenne de la tension de sortie pour pouvoir calculer la densité de flux thermique. Nous avons relevé les données toutes les minutes, et la moyenne est obtenue à partir d'environ 200 valeurs. La mesure s'achève lorsque  $\lambda$  varie de moins de 1,0% en l'espace de 60 minutes. La Figure 5 présente les résultats d'un essai. On voit bien l'intervalle où le régime permanent est atteint, grâce à des droites verticales en pointillés rouge.

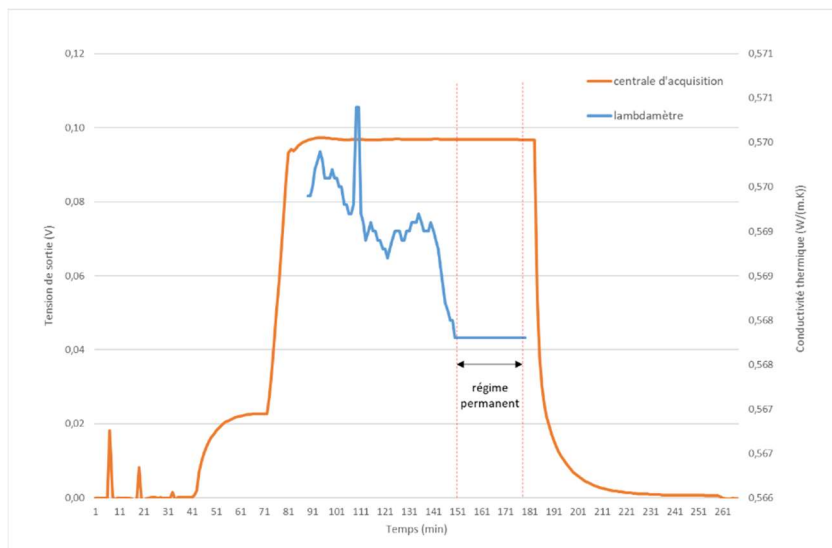


Figure 5 : Visualisation des mesures de tension de sortie de la centrale d'acquisition et des mesures de conductivité thermique avec le lambdamètre, au cours du temps.

### 2.3.3. Calcul de la sensibilité

Pour calculer le nouveau facteur, nous traçons le graphique de la densité de flux donnée à partir du lambdamètre ( $q_\lambda$ ) en fonction de la tension de sortie donnée par la centrale Agilent (E) pour chaque variation de température (5, 10 et 15°C), comme montré sur la Figure 6.

Une corrélation linéaire comme montrée sur l'équation 1 a été observée pour tous les capteurs. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est égal à 1 pour tous les fluxmètres analysés. La valeur finale de la sensibilité étalonnée (S) correspond donc à la pente de la droite obtenue.

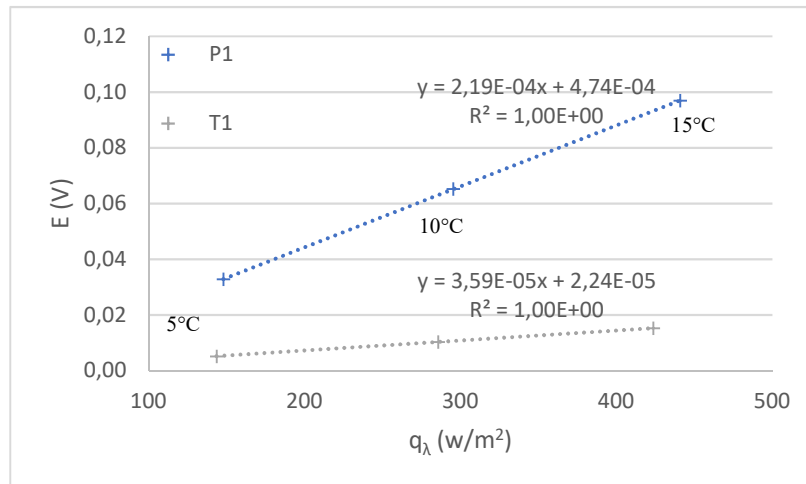


Figure 6 : Densité de flux obtenue à partir du lambdamètre ( $q_\lambda$ ) en fonction de la tension de sortie donnée par la centrale Agilent (E) pour chaque variation de température sur les fluxmètres P1 et T1 avec la méthode de l'échantillon étalon en verre.

## 3. Influence de la longueur du câble électrique

L'allongement du câble électrique est assez fréquent lors de mesures *in-situ* avec des centrales d'acquisition (nous ne parlons pas des capteurs autonomes). Ce type de modification entraîne une résistance supplémentaire au niveau de la chaîne de mesure. Le but ici est de présenter l'influence de la longueur du câble sur l'étalonnage avec la méthode ASTM C1130, donc sur la valeur finale de la sensibilité des capteurs.

Nous avons ajouté une longueur de 10 ( $\pm 0,01$ ) m de câble en cuivre étamé multibrin (diamètre intérieur égal à 7 x 0,193 mm) à chaque capteur (longueur initiale du câble égale à 3 m) et répété les mesures sans modifier leur positionnement dans le lambdamètre.

## 4. Incertitudes de mesure

Les incertitudes sur les valeurs mesurées ont été évaluées selon les directives internationales actuelles [10]. Pour les valeurs de densité de flux thermique ( $q_\lambda$ ), calculées à partir des valeurs de conductivité thermique ( $\lambda$ ), nous avons considéré les incertitudes de résolution et celles fournies par le fabricant du lambdamètre (reproductibilité et exactitude des mesures). Pour les valeurs de tension de sortie de la centrale d'acquisition (E), nous avons considéré les incertitudes de résolution et celles fournies par le fabricant (mesure, commutation et conversion du transducteur). Ces composants ont été combinés selon le principe de propagation des incertitudes avec un coefficient d'élargissement égal à 2, selon une loi rectangulaire de distribution.

Le calcul de l'incertitude pour la sensibilité (S) des fluxmètres a été fait selon le principe de propagation des incertitudes appliqué à l'équation 1, comme montré sur l'équation 3.

$$u_c(S) = \sqrt{\frac{u_{(E)}^2}{q_\lambda^2} + \frac{E^2}{q_\lambda^4} \cdot u_{(q\lambda)}^2} \quad (3)$$

## 5. Résultats et discussion

### 5.1. Sensibilité

Le Tableau 1 présente les valeurs des sensibilités d'usine pour les fluxmètres étudiés, ainsi que celles en étalonnant selon la méthode de l'étalon en verre et de la norme ASTM C1130.

| Echantillon | S <sub>usine</sub><br>V/(W/m <sup>2</sup> ) | Etalon verre          |                       |      | ASTM C 1130           |                       |      |
|-------------|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|------|
|             |                                             | S <sub>étalonné</sub> | ± u <sub>c</sub> (S)  | (ΔS) | S <sub>étalonné</sub> | ± u <sub>c</sub> (S)  | (ΔS) |
|             |                                             | V/(W/m <sup>2</sup> ) | V/(W/m <sup>2</sup> ) | %    | V/(W/m <sup>2</sup> ) | V/(W/m <sup>2</sup> ) | %    |
| P1          | 1,91E-04                                    | 2,19E-04              | 0,03E-04              | 14,6 | 1,95E-04              | 0,05E-04              | 2,1  |
| P2          | 1,84E-04                                    | 2,22E-04              | 0,03E-04              | 20,4 | 1,96E-04              | 0,05E-04              | 6,5  |
| T1          | 2,18E-05                                    | 3,59E-05              | 0,06E-05              | 64,5 | 2,47E-05              | 0,41E-05              | 13,3 |
| T2          | 2,14E-05                                    | 3,44E-05              | 0,06E-05              | 60,6 | 2,37E-05              | 0,41E-05              | 10,7 |

Tableau 1 : Sensibilités étalonnées des fluxmètres par la méthode avec échantillon étalon en verre et ASTM C1130 et écart (ΔS) entre les valeurs obtenues par rapport à la sensibilité d'usine.

Les différences observées entre les sensibilités d'usine et celles obtenues après étalonnage 5 ans plus tard montrent que cette étape est indispensable pour l'utilisation rigoureuse de tels capteurs sur des bancs d'essais *in-situ* et pour éviter des erreurs de mesure importantes.

La méthode de la norme américaine donne des valeurs plus proches de la sensibilité d'usine. Les différences peuvent être liées à la méthode d'étalonnage en usine, au niveau de densité de flux thermique de l'étalonnage ou à la dérive de la sensibilité dans le temps. De plus, on note que les fluxmètres troués donnent des résultats avec une incertitude plus faible que les pleins pour les deux méthodes. Cette différence est expliquée par des tensions de sortie beaucoup plus faibles pour les capteurs troués (environ 10 fois).

L'écart plus important par rapport à la sensibilité d'usine observé pour la méthode avec l'échantillon étalon en verre peut être dû à un effet de bord engendré par la différence de surface entre le fluxmètre et l'échantillon. Cependant, d'autres essais devront être réalisés pour valider cette méthode d'étalonnage puisque son principal atout est de se rapprocher des conditions opératoires *in-situ*. Par exemple, le matériau étalon en verre pourrait être remplacé par un matériau dont la conductivité thermique est similaire à celle de la paroi à instrumenter.

### 5.2. Câblage électrique

Le Tableau 2 présente les valeurs de sensibilité des fluxmètres calculées sans rallongement et avec rallongement du câble avec la méthode ASTM.

| Echantillon | Longueur initiale     |                       | Rallongé              |                       | (ΔS) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|
|             | S <sub>étalonné</sub> | ± u <sub>c</sub> (S)  | S <sub>étalonné</sub> | ± u <sub>c</sub> (S)  |      |
|             | V/(W/m <sup>2</sup> ) | V/(W/m <sup>2</sup> ) | V/(W/m <sup>2</sup> ) | V/(W/m <sup>2</sup> ) |      |
| P1          | 1,95E-04              | 0,05E-04              | 1,98E-04              | 0,05E-04              | 1,5  |
| P2          | 1,96E-04              | 0,05E-04              | 1,94E-04              | 0,05E-04              | -0,8 |
| T1          | 2,47E-05              | 0,41E-05              | 2,45E-05              | 0,41E-05              | -1,0 |
| T2          | 2,37E-05              | 0,41E-05              | 2,37E-05              | 0,41E-05              | 0,0  |

Tableau 2 : Sensibilités étalonnées des fluxmètres par la méthode ASTM C1130 avec et sans rallongement du câble et écart (ΔS) entre les valeurs obtenues.

Ces résultats montrent que le fait de multiplier la longueur initiale du câble par un facteur 4 n'intervient quasiment pas sur la sensibilité des capteurs et la précision de l'essai. En effet, les valeurs de sensibilité obtenues après rallongement sont comprises dans l'incertitude de la mesure avant rallongement.

## 6. Conclusion

Nous avons montré que la vérification de la sensibilité des capteurs de densité de flux thermique doit être menée en fonction de leur utilisation *in-situ* pour se rapprocher au plus près des conditions opératoires réelles. Pour cela, une nouvelle méthode d'étalonnage facilement réalisable en laboratoire a été présentée et comparée à la norme américaine.

Enfin, l'allongement du câble de raccordement n'influe pas de manière significative sur les mesures effectuées avec les capteurs de densité de flux thermique et peut être envisagé après positionnement des fluxmètres sur le banc d'essais si nécessaire.

## Références

- [1] G. Costantine, C. Maalouf, T. Moussa, and G. Polidori, "Experimental and numerical investigations of thermal performance of a hemp lime external building insulation," *Build. Environ.*, vol. 131, no. January, pp. 140–153, 2018.
- [2] T. Bejat, A. Piot, A. Jay, and L. Bessette, "Study of two hemp concrete walls in real weather conditions," in *Energy Procedia* 78, 2015, vol. 78, pp. 1605–1610.
- [3] B. Arregi, R. Garay-Martinez, J. Astudillo, M. García, and J. C. Ramos, "Experimental and numerical thermal performance assessment of a multi-layer building envelope component made of biocomposite materials," *Energy Build.*, vol. 214, no. 109846, 2020.
- [4] G. F. Jones and R. W. Jones, "Steady-state heat transfer in an insulated, reinforced concrete wall: Theory, numerical simulations, and experiments," *Energy Build.*, vol. 29, no. 29, pp. 293–305, 1999.
- [5] ASTM, *Building applications of heat flux transducers*, no. special technical publication 885. 1983.
- [6] ASTM International, *C1130: Standard Practice for Calibrating Thin Heat Flux Transducers*. 2017, pp. 1–8.
- [7] T. J. Sauer, O. D. Akinyemi, P. Thery, J. L. Heitman, T. M. DeSutter, and R. Horton, "Evaluation of a new, perforated heat flux plate design," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 35, pp. 800–804, 2008.
- [8] R. R. Zarr, B. Dougherty P., J. J. Filliben, and V. M. Fuentes, "Calibration of Thin Heat Flux Sensors for Building Applications Using ASTM C1130," *J. Test. Eval.*, vol. 29, pp. 293–300,

2001.

- [9] ASTM International, *C177: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate*. 2019.
- [10] Joint Committee For Guides In Metrology - JCGM, *Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2010, p. 134.

### **Remerciements**

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à Fabien Nougarrowles pour son expertise technique tout au long de la campagne de mesures.