

ISOLATION HYGROSCOPIQUE ET BIOSOURCÉE DES BÂTIMENTS ANCIENS



EXPERTISES

Projet ISOLHYBBA

RAPPORT FINAL

Mai 2026

REMERCIEMENTS

Nous remercions la société DEGRAVE, et tout particulièrement Monsieur Johan DEGRAVE, pour avoir mis à disposition du consortium un bâtiment à colombages situé à Puiseux-en-Bray, dans le département de l'Oise (région Hauts-de-France). Cette mise à disposition a permis de pallier les difficultés d'accès au démonstrateur en terre crue initialement prévu sur le site de Sense-City, en région parisienne, dans le cadre du projet ISOLHYBBA.

Nous remercions également Monsieur Étienne MARX de l'ADEME pour son suivi régulier, sa disponibilité, ainsi que pour ses conseils et recommandations adressés à l'ensemble des membres du consortium, ayant largement contribué à la réussite des actions menées dans ce projet.

Enfin, un grand merci à tous les membres du consortium, permanents ou contractuels (stagiaires de Master ou post-doctorats), qui ont participé activement à la mise en œuvre des solutions d'isolation hygroscopique, Géo et biosourcée des bâtiments, aux mesures en laboratoire et aux essais in situ, aux simulations numériques, ainsi qu'à la rédaction du rapport final et du guide de bonnes pratiques à destination des professionnels de la réhabilitation et des particuliers.

CITATION DE CE RAPPORT

LARBI-YOUCHEF Mohamed, UPEC, REMOND Romain, LERMAB, MOUGEL Eric, LERMAB, DEGRAVE Johan, Société Degrave, ALGLAVE Gilles, Maisons Paysannes de France, BOUDENNE Abderrahim, UPEC. 2025. Projet ISOLHYBBA. 114 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document diffusé par l'ADEME a été réalisé à l'initiative de son/ses auteur(s) ; il a reçu un soutien financier de l'ADEME mais n'engage pas l'ADEME. Son contenu (ou les données qu'il contient) n'engage que la seule responsabilité de son/ses auteurs et ne représente pas la position de l'ADEME.

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01
Numéro de contrat : 2304D0007

Projet de recherche coordonné par : Abderrahim BOUDENNE
Appel à projet de recherche : Vers des bâtiments responsables Edition 2022

Coordination technique - ADEME : Etienne MARX
Direction/Service : Direction Ville et Territoires Durables/ Service Bâtiment

Résumé

Le projet ISOLHYBBA vise à approfondir les connaissances sur le comportement hygrothermique des bâtiments à colombages dont les murs sont isolés à l'aide de matériaux hygroscopiques et géo ou biosourcés. Les façades de ces maisons, caractéristiques des centres-villes historiques, participent fortement à leur attrait touristique. La réhabilitation thermique de ces constructions repose généralement sur l'ajout d'un isolant thermique par l'intérieur (ITI). Toutefois, cette approche peut entraîner un refroidissement des murs et limiter leur capacité de séchage, aussi bien vers l'intérieur que vers l'extérieur, notamment en raison de la présence d'un pare-vapeur. Ainsi, la mise en œuvre de l'ITI doit être soigneusement étudiée afin de préserver l'intégrité des pans de bois présents dans les murs des bâtiments à colombages.

Une alternative consiste à recourir à l'isolation thermique par l'extérieur (ITE), qui offre une meilleure protection contre les intempéries. Cependant, cette méthode peut nuire à l'aspect architectural et patrimonial des façades, au bénéfice de l'esthétique intérieure.

L'objectif principal de ce projet est de déterminer le coefficient de transmission thermique surfacique (U) des murs de bâtiments anciens à colombages, isolés avec des matériaux géo et biosourcés et hygroscopiques. Pour cela, une base de données des propriétés thermiques et hygriques des solutions d'isolation géo et biosourcées et des matériaux de construction utilisés a été constituée. En parallèle, une vaste campagne de mesures expérimentales in situ a été menée pour caractériser les transferts hygrothermiques sur une façade d'un bâtiment test à colombages. Des essais complémentaires ont été réalisés en laboratoire, sur une paroi à colombages insérée dans une chambre bi-climatique permettant de soumettre l'une de ses faces à des variations contrôlées de température et d'humidité.

Des outils de simulation dynamique, tels que HAM-Tools et WUFI, ont été utilisés pour analyser le comportement hygrothermique des différentes configurations de murs étudiées, tant en laboratoire que sur site. Le coefficient U a été estimé en fonction des variations de température et d'humidité à l'aide d'un modèle numérique basé sur une méthode inverse.

Enfin, un cahier de recommandations à destination des professionnels de la réhabilitation du bâti ancien a été élaboré, afin de guider la mise en œuvre de solutions d'isolation géo et biosourcées compatibles avec la préservation du patrimoine et les exigences de performance énergétique.

Abstract

This project aims to deepen our understanding of the hygrothermal behavior of half-timbered buildings whose walls are insulated using hygroscopic and geo or biobased materials. The façades of these houses, characteristic of historic city centers, contribute significantly to their touristic appeal. The thermal retrofitting of such buildings typically involves the addition of interior thermal insulation (ITI). However, this approach can lead to a reduction in wall temperatures and limit their drying capacity, both inward and outward, particularly due to the presence of a vapor barrier. Therefore, the implementation of ITI must be carefully assessed to preserve the integrity of the timber elements embedded in the walls of half-timbered buildings.

An alternative lies in external thermal insulation (ETI), which provides better protection against weather exposure. Nevertheless, this method can compromise the architectural and heritage value of the façades, favoring interior aesthetics over historical appearance.

The primary objective of this project is to determine the surface thermal transmittance coefficient (U-value) of walls in traditional half-timbered buildings insulated with geo and biobased and hygroscopic materials. To this end, a comprehensive database was developed, compiling the thermal and hygric properties of selected geo and biobased insulation materials and construction components used in this project. In parallel, a large-scale in-situ experimental campaign was carried out to characterize hygrothermal transfers through a test facade of a half-timbered building. Complementary laboratory tests were performed on a half-timbered wall integrated into a bi-climatic chamber, allowing one side to be subjected to controlled temperature and humidity variations.

Dynamic simulation tools, such as HAM-Tools and WUFI, were employed to analyze the hygrothermal behavior of various wall configurations under laboratory and field conditions. The U-value was estimated using a numerical model based on an inverse method, accounting for variations in temperature and relative humidity.

Finally, a guidance document for professionals involved in the renovation of historical buildings was developed. This document provides recommendations for the implementation of geo and biobased insulation solutions that are compatible with both heritage preservation and energy performance requirements.

SOMMAIRE

1. Contexte du projet.....	8
1.1. Contexte et enjeux	8
1.2. Etat de l'art et caractère innovant du projet	11
1.3. Positionnement du projet.....	13
1.4. Objectifs généraux du projet	13
1.4.1. Objectifs scientifiques et techniques.....	13
1.4.2. Objectifs socioéconomiques et réglementaires	14
1.4.3. Objectifs environnementaux.....	14
2. Méthodologie	15
3. Résultats obtenus	16
3.1. Etat de l'art sur l'ITI des murs à pans de bois.....	16
3.1.1. Cadrage de la réhabilitation thermique du bâti ancien.....	16
3.1.2. La réhabilitation par l'intérieur des murs à pans de bois	18
3.1.3. Bilan de l'état de l'art de l'ITI en bois.....	24
3.2. Caractérisation des matériaux utilisés dans le projet.....	25
3.2.1. Mesure des propriétés thermophysiques.....	25
3.2.2. Mesure des propriétés hydriques	26
3.3. Caractéristiques des matériaux utilisés	27
3.4. Etude en laboratoire du mur à colombage.....	29
3.4.1. Mur à colombage initial.....	29
3.4.2. Ajout de l'isolation thermique intérieure (ITI)	31
3.4.3. Période de séchage de la solution ITI terre -chanvre	32
3.4.4. Comportement hygrothermique du mur avec ou sans ITI et confrontation à la modélisation Wufi	34
3.5. Synthèse sur l'étude en laboratoire du mur à colombage.....	42
3.5.1. Utilisation du modèle WUFI pour extrapoler à différentes configurations.....	42
3.6. Modèle numérique de transferts couplés de chaleur et d'humidité des murs à colombage avec isolation hygroscopique et géo/biosourcée.....	44
3.6.1. Structure du code de calcul	44
3.6.2. Modèle mathématique des transferts de chaleur, humidité et air	46
3.6.3. Modèle monodimensionnel de transport de chaleur, humidité et air dans les enveloppes de bâtiment.....	47
3.6.4. Modèle numérique de transfert dans les murs.....	48
3.7. Etude de cas de la paroi du projet BAUCH	50
3.7.1. Résultats cas de la paroi du projet BAUCH	51

3.7.2.	Etude de cas du nouveau mur construit au LERMAB.....	54
3.8.	Expérimentations In-situ sur un bâtiment à Puiseux-en-Bray.....	60
3.9.	Résultats des mesures In-Situ d'un bâtiment à Puiseux-en-Bray.....	64
3.10.	Confrontation des simulations numériques aux mesures In-Situ du bâtiment à Puiseux-en-Bray.....	70
3.10.1.	Isolation avec combijute.....	70
3.10.2.	Isolation avec Terre chanvre	72
3.11.	Estimation du coefficient U de transmission surfacique.....	80
3.11.1.	Méthode d'estimation de paramètres.....	80
3.11.2.	Estimation mur avec ITI en combijute été 2023	81
3.11.3.	Estimation mur avec ITI en combijute printemps 2024.....	84
3.11.4.	Estimation mur avec ITI en terre chanvre hiver 2024	85
3.11.5.	Estimation mur en terre chanvre printemps 2024.....	87
4.	Conclusion / Perspectives	90
5.	Valorisation – diffusion du projet.....	92
5.1.	Organisation d'une Journée Technique dédiée aux bâtiments à colombages, 26 septembre 2024 Epinal.....	92
5.2.	Présentation dans la conférence JITH 2024 : International Days on Thermal Science and Energy, Paris, 29–31 October 2024.....	92
5.3.	Publication d'un guide de recommandations.....	93
6.	Références bibliographiques	94
	Index des tableaux et figures	96
	Sigles et acronymes	100
	Nomenclature	101
	Annexe A	102
A	Comportement hygrothermique du <i>mur torchis standard isolé</i> (zone 4 – isolant combijute) ...	102
A-1	température au sein du mur isolé en combijute	103
A-2	Humidité au sein du mur isolé en combijute	105
	Annexe B.....	107
B	Analyse des données sur le mur nu (Torches allégées).....	107
B-1	Analyse de la température en différents points selon l'épaisseur	107
B-2	Analyse l'HR en différents points selon l'épaisseur	108
B-3	Evolution de la température au sein du mur avec ITI (Torches allégées).....	110
B-4	Evolution de l'HR au sein du mur isolé (Torches allégées).....	112
	Annexe C	114

1. Contexte du projet

1.1. Contexte et enjeux

Réhabilitation des bâtiments dits « anciens »

Depuis le début des années 2000 une directive européenne envisage l'adaptation de la réglementation énergétique actuelle aux bâtiments existants et aux spécificités régionales. Partant du constat que le patrimoine bâti français est très hétérogène, la recherche d'économies d'énergie dans les bâtiments existants doit être engagée avec une grande prudence. En particulier, les bâtiments dits « anciens » sont régis par un fonctionnement physique relativement méconnu et très différent de celui des bâtiments d'après-guerre (l'apparition de procédés industriels ayant considérablement modifié les ouvrages dans leur conception). Les principaux matériaux anciens (pierres, bois, mortiers, terres crues ou cuites...) présentent ainsi un équilibre hygrothermique subtil et sont très sensibles aux conditions d'humidité. L'objectif de cette étude est de mieux connaître le comportement thermique de ce patrimoine bâti et de proposer une méthode de mesure du coefficient U de transmission thermique des murs dotés d'une isolation hygroscopique géo et/ou biosourcée en tenant compte des transferts couplés de chaleur et d'humidité. Il s'agira également de réaliser une base de données des caractéristiques thermiques et hydriques des matériaux utilisés.

Le projet de loi sur la transition énergétique, qui a été suivi de très près par Maisons Paysannes de France (MPF) et ses consœurs, a été voté une deuxième fois par l'Assemblée nationale le 26 mai 2015. Il reprenait plusieurs amendements du Sénat relatifs à l'isolation des bâtiments anciens. La mobilisation de MPF portait notamment sur un des points obligeant les propriétaires de bâtiments (quels qu'ils soient) à isoler par l'extérieur lors d'un ravalement de façade. Pour finir, l'Assemblée nationale s'est rangée à cette revendication de MPF.

C'est une simple obligation d'isoler et non plus une obligation d'isoler par l'extérieur qui a été retenue en cas de « travaux de ravalement importants ». Les travaux de réhabilitation énergétiques doivent quant à eux être réalisés en « tenant compte des spécificités énergétiques et architecturales du bâti ancien » mais « en se rapprochant le plus possible des exigences applicables aux bâtiments neufs ».

Comme illustré ci-dessus, les bâtiments anciens font toujours l'objet d'une attention très particulière. Deux exigences se sont trouvées ainsi confrontées : d'une part, la préservation du bâti ancien, d'autre part, la mise en place de mesures d'efficacité énergétique. Ainsi, les ministères concernés (chargés de la transition écologique et du logement) ont initié des actions à destination de ce type de bâtiment dans le cadre du Grenelle de l'environnement et par la suite dans le Plan Bâtiment Durable. En particulier, des projets ont été lancés pour développer des connaissances sur le comportement thermique du bâti ancien et les mesures à apporter pour améliorer ses performances.

Cependant, les pouvoirs publics relancent périodiquement des demandes pour adapter les bâtiments anciens à la réglementation actuelle. Lors de la présentation du plan de relance le 03 septembre 2020, la ministre de la Transition écologique, assure que ce virage permettra de « développer des filières qui vont faire de l'innovation et de la réhabilitation avec du chanvre, du lin, ou des filières de matériaux locaux ». Il semblerait qu'il existe une ouverture de la part des pouvoirs publics à destination des bâtiments anciens dans la mesure où il est question d'utiliser des matériaux naturels.

Le Gouvernement a bâti un 4^e Programme d'investissements d'avenir (PIA 4) prenant en compte les réalités territoriales et répondant aux enjeux de la transition écologique, de la compétitivité et de l'indépendance de l'économie. Doté de 20 Md€ sur cinq ans, ce programme contribue d'ores et déjà à hauteur de 11 Md€ au plan de relance, afin d'en accélérer la dynamique d'innovation.

L'AAP de l'ADEME « Industrialisation de produits et systèmes constructifs bois et autres biosourcés » s'inscrit dans le cadre du volet dirigé du nouveau PIA 4, pour la stratégie d'accélération « Ville Durable et Bâtiments innovants » dont un des objectifs est de soutenir la massification de la construction et de la réhabilitation bois et d'anticiper une montée en charge de la construction bois et biosourcée.

Isolants biosourcés : matériaux et performances

L'isolant le plus utilisé en France depuis 30 ans est la laine de verre, qui en représente pour ainsi dire l'étalon de mesure. La présence sur le territoire d'un leader mondial n'y est pas étrangère. Malgré leur très bon rapport prix/performance, les laines minérales présentent en effet un écobilan médiocre, mobilisant pour leur fabrication de 3 à 8 fois plus d'énergie que les isolants biosourcés. Ils sont également plus difficilement recyclables. Mais le domaine est en pleine mutation. Si les isolants d'origine minérale et synthétique (laines minérales et polystyrènes essentiellement), restent de loin les plus employés en France, les isolants biosourcés font depuis quelques années une percée spectaculaire et dépasseraient actuellement 10 % du marché (murs et toiture) et le marché connaît une croissance à deux chiffres. Les isolants biosourcés sont en moyenne 10 à 15 % plus cher que les isolants traditionnels tout en présentant d'autres qualités : un meilleur confort acoustique, une meilleure durée de vie, et très peu de risque d'effets toxiques des matériaux.

Les isolants biosourcés sont des isolants issus de matières renouvelables, comme la biomasse végétale ou animale, ainsi que d'autres éco-matériaux, ou de matériaux recyclés. L'emploi de ces isolants doit contribuer à la réduction de l'émission des gaz à effet de serre, leur production doit donc se faire de manière peu polluante. Toutes les caractéristiques des matériaux sont vérifiables sur leur fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES). Un isolant biosourcé est en effet reconnu comme tel par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) qui recense les matériaux biosourcés. Il existe également un label « bâtiment biosourcé » depuis 2012 dans le code de la construction et de l'habitation.

Le terme d'isolation végétale est assez vaste. Il fait référence aux isolants constitués de matière d'origine végétale : paille, chanvre, bois... Plusieurs de ces isolants peuvent contenir jusqu'à 25 % de polyester qui permet de lier entre elles les fibres végétales pour structurer le matériau et former un matelas laineux.

La laine de bois est l'un des isolants végétaux les plus connus. Comme la plupart, elle est d'origine naturelle et est recyclable. Elle offre un assez bon pouvoir isolant thermique et acoustique ($\lambda = 0,040 \text{ W/m.K}$). Sa perméabilité à la vapeur d'eau élevée ($\mu = 1 \text{ à } 3$) convient parfaitement à l'habitat ancien aux murs perspirants. Par ailleurs, sa masse volumique est importante 50 kg/m³ et une capacité calorifique de 2 100 J/kg.K et permet donc d'obtenir un excellent confort d'été en retardant la pénétration de chaleur de plusieurs heures. Les épisodes répétés de canicule qui touchent désormais toute la France en font un matériau idéal pour résister à la chaleur. La laine de bois est robuste : sa durée de vie est d'environ 50 ans. Non irritante, sa pose sera bien plus agréable que la laine de verre.

La laine de chanvre est un très bon isolant thermique et acoustique ($\lambda = 0,035 \text{ W/m.K}$). D'origine naturelle, recyclable et réutilisable, cet isolant est conseillé à toutes les personnes soucieuses de la protection de l'environnement. Un logement isolé à la laine de chanvre est un logement qui respire. En effet, cet isolant a une très bonne perméabilité à la vapeur d'eau ($\mu = 1 \text{ à } 2$).

La laine de coton est une solution d'isolation respectueuse de l'environnement. Fabriquée à partir de chutes de l'industrie textile ou du recyclage de vêtements usagés, elle permet d'offrir une nouvelle vie à ces matériaux. L'avantage du textile recyclé est sa masse volumique. Très léger, environ 10 kg/m³, il est adapté à l'isolation des combles ou des plafonds. Avec une conductivité thermique oscillant entre 0,039 W/m.K et 0,042 W/m.K.

La paille est l'une des solutions les plus utilisées par les maisons auto-construites en bois. C'est, en effet, une isolation très respectueuse de l'environnement. La paille est la plupart du temps utilisée directement en botte. Elle peut également être utilisée en torchis isolant composée de 85 % de paille, de 10 % d'argile et de 5 % de chaux. Cette combinaison est un bon répulsif pour les rongeurs et permet une très bonne résistance au feu. Ce torchis offre un pouvoir thermique correct, entre 0,052 W/m.K et 0,080 W/m.K. Ainsi, 35 cm de cet isolant équivalent à 30 cm de laine de verre. Comme le lin, la paille a un caractère hygroscopique et peut donc contribuer à l'équilibre hydrique inter saisonnier typique de l'habitat ancien : absorption de l'humidité en hiver, réémission de la vapeur d'eau en été. Avec la laine de verre, la paille est l'isolant le moins cher du marché, à environ 5 €/m².

La laine de lin est constituée des fibres courtes non utilisées par l'industrie textile. Pour former des panneaux isolants, les fibres sont mélangées à du polyester. La laine de lin est un bon isolant : sa conductivité thermique va de 0,037 W/m.K à 0,042 W/m.K. Elle est également très résistante dans le temps et se dégrade peu à l'humidité, malgré son fort pouvoir hygroscopique : la fibre de lin est capable d'absorber et de réémettre une forte quantité d'eau sans se détériorer. La laine de lin est facile à travailler car non irritante et bien plus douce que le chanvre. Disponibles en rouleau ou en panneau, les isolants en lin se cachent à tous les étages de la maison. Les rouleaux, qui s'utilisent comme la laine de chanvre, isolent

les combles, les planchers en bois aux étages ou sans vide sanitaire, ou se déposent sous la toiture. De leur côté, les panneaux isolent les murs par l'intérieur ou sont utilisés sous les planchers pour isoler des bruits d'impact. La laine de lin est légère, et donc facile à poser. Et, qualité non négligeable : le lin ne provoque pas d'irritations ! Ce nouvel isolant est propre : aucun produit chimique n'est utilisé, de la plante jusqu'au produit fini. De plus : il est totalement recyclable. Enfin, cerise sur le gâteau : depuis mars 2011, l'isolant Biofib'duo de Cavac Biomatériaux, un mix de fibres de chanvre et de lin, a obtenu la certification ACERMI (Association pour la Certification des Matériaux Isolants). Cette certification lui ouvre la porte pour répondre aux appels d'offre des chantiers publics et des constructions basse consommation... et démontre la qualité et l'efficacité de ces produits biosourcés !

1.2. État de l'art et caractère innovant du projet

De nombreuses avancées sont attendues concernant l'amélioration des connaissances sur les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux hygroscopiques. Ce thème du transport d'humidité dans les parois du bâti bois fait l'objet d'un surcroît d'intérêt de la part de la communauté scientifique en charge de la thermique et de l'énergétique du bâtiment, en raison du rôle joué par les transferts de masse sur le comportement énergétique réel du bâtiment et sur le confort ressenti par les occupants. Là encore, des gisements énergétiques importants sont précisément attendus dans la prise en compte, dans le dimensionnement de l'ouvrage, du comportement dynamique des transferts au sein de la paroi. Le projet s'articule autour de la formulation et modélisation numérique des phénomènes de transport masse/chaleur et de la caractérisation et la collecte de données expérimentales pour l'alimentation et la validation des modèles. Enfin, des tentatives seront menées pour mieux caractériser le coefficient de transmission thermique des murs. La COP21 a également placé le bâtiment au cœur du défi climatique. Il sera sollicité pour limiter le réchauffement de la planète entre 1,5 et 2 degrés.

Un projet dénommé BATAN (BAti ANcien), financé par le Ministère du Développement Durable et l'ADEME, a été mené par l'association Maisons Paysannes, le CETE de l'Est et de l'Ouest, l'ENTPE et le CNRS et avait pour objectif de définir une modélisation du comportement thermique du bâti ancien, en lien avec les consommations énergétiques.

Un autre projet ATHEBA (Amélioration THERmique du Bâti Ancien) a également été initié par Maisons Paysannes de France. Il a bénéficié du soutien du Ministère du Développement Durable, de celui de la Culture, de la Fondation du Patrimoine et de grandes organisations professionnelles du Bâtiment. Les buts poursuivis sont la diffusion d'informations notamment par des fiches pratiques sur Internet et la création de référentiels de formation pour les professionnels en développant un large esprit d'ouverture vers et avec tous ceux qui sont concernés par ce sujet.

Enfin, le projet EnR-ABF (Économies d'énergie avec les Architectes des Bâtiments de France), mené par Maisons Paysannes de France et l'Agence Tribu Energie, a établi une synthèse technique, juridique et architecturale, visant à concilier travaux d'amélioration énergétique, réglementation et préservation du patrimoine des espaces protégés.

TRANSBATIBOIS était un projet ANR de l'appel à projet Prebat 2007 sur les transferts de parois de bâtiments bois. Il a regroupé le LERMAB, le LERFOB, le LEMTA, le CRITT Bois ainsi que des PME et TPE actives dans l'industrie de la construction bois. Le LERMAB a mis en place dans ce projet une double chambre climatique expérimentale qui permet d'imposer les conditions climatiques de part et d'autre de la paroi. La paroi testée est équipée de capteurs de température et d'humidité qui permettent de relever les profils de température et d'humidité en différents points de la paroi et ceci pendant toute la durée d'exposition.

HYGRO-BAT est un projet qui a été soutenu par l'ANR de 2010 à 2013. Il a regroupé sept laboratoires reconnus dont le LERMAB, trois centres EPIC et trois industriels. Dans ce projet, les acteurs ont comparé leurs méthodes de caractérisation de propriétés de transfert massique, comparé leurs modèles HAM et tâché de construire une démarche de conception hygrothermique des bâtiments.

Le CERTES, ALPHEEIS et FLIR ATS ont mené successivement trois projets concernant l'application de la thermographie quantitative à destination des murs de bâtiments. Le projet PROTOMERES, dans lequel EDF R&D a pris part, puis le projet NADIIAH ont permis de mettre en œuvre un protocole de mesure et de contrôle de l'isolation intérieure des murs. La thermographie active qui consiste au chauffage des murs par lampes halogènes et la mesure par caméra infrarouge a permis d'estimer l'épaisseur d'isolant de doublages différents. Les résultats ont montré que sur 90 % des essais in situ, l'épaisseur est correctement estimée avec un maximum de 25 % d'incertitude (Figure 1).

Fort de ces acquis encourageants, ce même consortium a soumis à l'ADEME le projet DPE_IITI qui consiste en l'utilisation de la thermographie passive pour déterminer la résistance thermique de murs verticaux. Ce projet a été financé et soutenu par l'ADEME. La ville de Noisiel en Seine-et-Marne ainsi que le bureau d'études TCEP ont rejoints le consortium de ce projet.

Le CERTES, ALPHEEIS, Maisons Paysannes de France et FLIR ATS se sont également impliqués dans des travaux destinés à l'étude de bâtiments anciens à travers le projet FaHeBA lauréat de l'appel à projet ADEME « Bâtiments responsable 2020 » qui concerne la mise en place d'une méthode de détermination du coefficient U des murs à façade hétérogène. Les bâtiments ciblés étaient ceux à colombages (ou pan

de bois). Le LERMAB (Laboratoire d'Études et de Recherche du Matériau Bois) de l'université de Lorraine est très impliqué dans des projets sur la thématique des transferts couplés de chaleur et de masse au sein des matériaux lignocellulosiques. Ainsi, une cellule climatique régulée en température et humidité a été réalisée sur le campus Bois d'Épinal (Figure 2). Cet équipement a servi dans plusieurs travaux de thèse et des projets de recherche.

C'est pour ses compétences et son savoir-faire que le LERMAB a rejoint le consortium pour participer au projet BAUCH soutenu par l'ADEME de 2017 à 2020 qui concerne la recherche dans les bâtiments anciens à colombage. Le but était de proposer une méthode de calcul du coefficient U de transmission thermique surfacique des murs à colombage avec prise en compte des transferts couplés de chaleur et d'humidité.



Figure 1 : Mesure thermographique au siège de Maisons Paysannes de l'Oise



Figure 2 : Enceinte Bi-Climatique, LERMAB Campus Bois ENSTIB Épinal

L'intérêt des projets passés et en cours de ce nouveau consortium est de fédérer et mutualiser les compétences en thermographie infrarouge et en mesures thermo-hydriques qui permettent une maîtrise des différents paramètres liés à l'utilisation de ce type de mesure. En particulier, cette technique peut être appuyée par des relevés par sondes de contact, une détermination préalable de la température d'environnement et surtout des mesures d'émissivité. Le présent consortium a ainsi développé diverses méthodes pour mesurer et estimer les coefficients de transmission thermique de murs extérieurs ainsi que les mesures thermo-hydriques. Il se propose à présent, dans ce projet, de mener une recherche en connaissances nouvelles par un mixage de différentes méthodes de mesures sur des murs de bâtiments anciens à façade et structure hétérogènes telles que colombages et isolés par des matériaux géo et/ou biosourcés et hygroscopiques. Le but est d'apporter une aide à la détermination du coefficient de transmission surfacique avec des mesures et modèles d'estimation de paramètres. Les connaissances acquises produiront les outils nécessaires aux professionnels du diagnostic et de l'audit de bâtiments anciens.

Au niveau Européen, il est possible de citer le projet 3-ENCULT qui avait regroupé 22 partenaires d'une dizaine de pays européens avec un financement de 6,6 millions d'euros. Récemment, le projet H2020 RIBuild a été lancé avec un budget de 5,3 millions d'euros pour faire une synthèse sur les recherches dans la rénovation et la réhabilitation de bâtiments historiques avec isolation thermique intérieure. Les actions de recherche systémique impliquaient des spécialistes du patrimoine culturel ancien, des thermiciens et des économistes dans le but de concilier la préservation des bâtiments et l'efficacité énergétique.

Plusieurs sous projets ont été menés dans différents pays : trois en Italie, un au Danemark, un en Autriche, un en Allemagne, un en Espagne et enfin un en Suisse selon les informations du site Internet dédié.

Actuellement, les travaux du Fraunhofer Institute en Allemagne ont connu des développements importants notamment concernant l'innovation dans les isolants biosourcés et des solutions à apporter pour les pathologies de murs anciens.

Sur le plan international, des études ont mis en avant les risques liés à l'humidité : dégradation des conditions de confort, baisse des performances énergétiques. Ainsi, dans le cadre de l'annexe 41 de l'agence internationale de l'énergie des laboratoires de près de 20 pays ont travaillé sur ce sujet. A l'issue de ce programme commun, la nécessité de plus de données expérimentales a été mise en évidence pour mieux comprendre la physique des transferts couplés de chaleur et de masse. Ces travaux permettent une meilleure fiabilité des modèles hygrothermiques de bâtiments.

1.3. Positionnement du projet

Le projet ISOLHYBBA propose d'apporter des solutions pour améliorer la performance des enveloppes des bâtiments anciens à colombage. Le caractère hygroscopique de ces bâtiments nécessite d'étudier la possibilité de sauvegarder cette architecture par l'installation d'une isolation géo et/ou biosourcée et hygroscopique. Le corollaire est la possibilité de fournir les connaissances pour une réhabilitation performante. En même temps, il s'agit de proposer des matériaux durables et recyclables. Les impacts positifs de ces solutions devront être caractérisés par le calcul du coefficient U réglementaire en tenant compte des transferts de chaleur et d'humidité.

Le projet ISOLHYBBA est en phase avec les préoccupations des pouvoirs publics en matière de lutte contre la précarité énergétique dans les bâtiments anciens à colombage. Les solutions d'isolation hygroscopique géo et biosourcées rentrent dans le cadre des exigences de la loi climat et résilience adoptée en juillet 2021 et de la réglementation RE 2020.

Les solutions étudiées doivent permettre aux propriétaires d'aborder la question du DPE en toute sérénité et le cas échéant d'entamer une réhabilitation ou une réhabilitation de l'enveloppe de leur construction. Pour finir, les bâtiments pourront afficher des baisses de consommation d'énergie de chauffage ou climatisation. Finalement, l'objectif principal est d'apporter de la performance et de l'efficacité énergétique à ces bâtiments durables par essence.

1.4. Objectifs généraux du projet

Inscrit dans le contexte de la RE2020, qui promeut l'utilisation de matériaux bas carbone dans le bâtiment, ce travail s'inscrit dans une logique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de préservation du patrimoine architectural et d'innovation réglementaire vers une obligation de résultats.

De nombreuses avancées sont attendues dans le cadre de ce projet pour répondre à plusieurs interrogations pour l'amélioration des connaissances sur les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les parois à base de matériaux de construction hygroscopiques comme du bâti torchis /bois. Plusieurs objectifs sont visés dans le cadre du projet qui inclut de la métrologie en laboratoire, des tests in-situ sur mur d'une maison à colombage et de la modélisation numérique.

1.4.1. Objectifs scientifiques et techniques

L'objectif scientifique principal de ce projet était de développer une méthode précise de détermination du coefficient de transmission thermique surfacique des murs anciens à colombage isolés avec des matériaux hygroscopiques géo et biosourcés, en prenant en compte les transferts couplés de chaleur et d'humidité. Face à l'hétérogénéité des murs anciens et à la variabilité des propriétés thermiques des matériaux naturels, il devient nécessaire de considérer ce coefficient comme une variable plutôt qu'une constante. Ce travail mené par le consortium a nécessité la création d'une base de données sur les matériaux utilisés, des expérimentations en laboratoire dans des cellules bi-climatiques, ainsi que la modélisation des phénomènes hygrothermiques affectant toutes les couches du mur, notamment l'isolant.

1.4.2. Objectifs socioéconomiques et réglementaires

Depuis les lois issues du Grenelle de l'environnement jusqu'à la RE2020, la France poursuit ses ambitions en matière de rénovation énergétique, avec notamment l'objectif de rénover 700 000 logements par an et de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment. Dans ce contexte, le recours aux matériaux biosourcés et hygroscopiques est encouragé, en particulier pour les bâtiments anciens, qui représentent une part importante du parc immobilier et nécessitent des solutions respectueuses de leur structure et de leur nature.

Le projet ISOLHYBBA s'inscrit dans la continuité de plusieurs projets antérieurs menés par les membres du consortium. Il a pour objectif de développer une méthode d'isolation thermique non destructive, spécifiquement adaptée à la réhabilitation énergétique des bâtiments à colombages, en s'appuyant sur l'utilisation de matériaux géo et biosourcés pour traiter les murs anciens aux façades hétérogènes

1.4.3. Objectifs environnementaux

Le projet ISOLHYBBA s'inscrit pleinement dans les objectifs des politiques publiques et des appels à projets de l'ADEME, en proposant des solutions adaptées aux bâtiments anciens construits avec des matériaux locaux, comme les maisons à colombages, afin de réduire l'énergie grise et d'intégrer des matériaux isolants géo et/ou biosourcés et hygroscopiques. Ces derniers, écologiques, renouvelables sont capables de stocker du CO₂, favorisent une construction durable et locale, tout en répondant aux enjeux de l'écoconstruction. Fort de l'expérience du consortium, ce projet entend approfondir les connaissances et les méthodes de mesure du coefficient de transmission thermique des murs anciens, en misant sur les capacités de régulation thermique des matériaux hygroscopiques pour améliorer le confort d'été et réduire les besoins en rafraîchissement.

2.Méthodologie

Le projet ISOLHYBBA comprend des études expérimentales menées à la fois en laboratoire, à l'échelle du matériau et de la paroi, ainsi qu'in situ. Les résultats obtenus serviront de données d'entrée pour des modèles numériques, permettant in fine de confronter les résultats issus de la simulation aux mesures réalisées sur site. Le schéma organisationnel du projet ISOLHYBBA est présenté à la Figure 3.

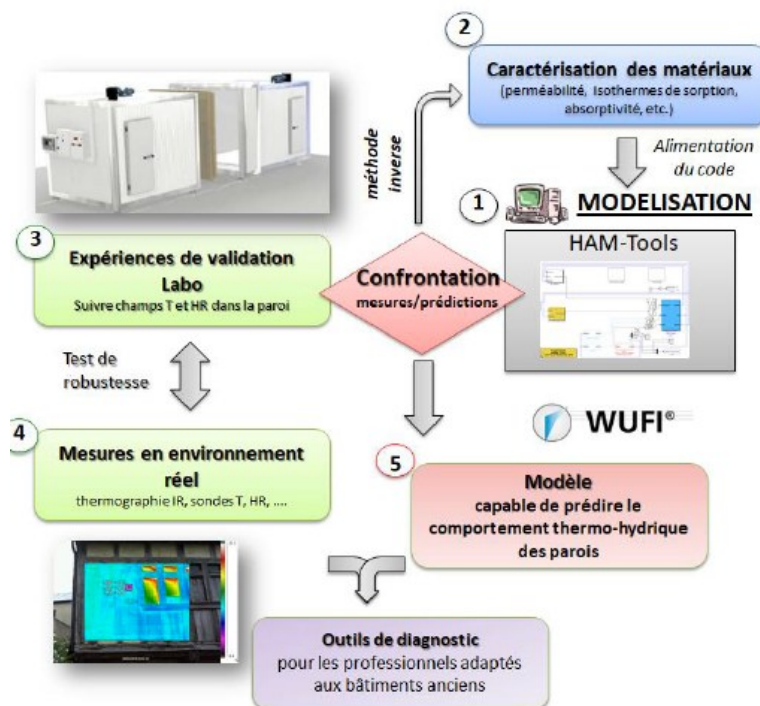


Figure 3 : Synopsis d'organisation du projet ISOLHYBBA

Le projet ISOLHYBBA se compose de quatre lots techniques, auxquels s'ajoute un lot de pilotage dédié à la coordination et à la gestion du projet (voir Tableau 1). Conformément à la démarche envisagée, les trois premiers lots techniques ont pour objectif, dans un premier temps, d'analyser le comportement thermique et hydrique de murs à colombage intégrant une isolation hygroscopique géo et biosourcée, ainsi que de développer des modèles théoriques adaptés. Dans un second temps, ils visent à définir un protocole de mesure approprié pour la métrologie en laboratoire. Enfin, une méthode de détermination du coefficient de transmission thermique des murs isolés sera proposée, intégrant les transferts couplés de chaleur et de masse. La dernière phase du projet est consacrée à la rédaction d'un cahier de recommandations à destination des professionnels, notamment les artisans et les bureaux d'études.

Lot 1 Coordination et gestion CERTES	Lot 2 Modèles thermiques de murs à colombages LERMAB CERTES	Lot 3 Métrologie en laboratoire et démonstrateur LERMAB CERTES DEGRAVE	Lot 4 Validation et estimation paramètres CERTES LERMAB	Lot 5 Cahier de recommandations MPF
• Lot 1.1. Coordination avec l'ADEME • Lot 1.2. Suivi et gestion	• Lot 2.1. Pré-étude • Lot 2.2. Etat de l'art • Lot 2.3. Modèles numériques	• Lot 3.1. Expérimentation laboratoire • Lot 3.2. Pose panneaux isolants hygroscopiques et biosourcés • Lot 3.3. Mesures Sense-city • Lot 3.4. Base de données matériaux	• Lot 4.1 Validation modèles • Lot 4.2. Estimation paramètres • Lot 4.3 Définition coefficient transmission thermique	• Lot 5.1. réalisation cahier de recommandation pour les professionnels

Tableau 1 : Répartition et organisation des lots

3. Résultats obtenus

3.1. État de l'art sur l'ITI des murs à pans de bois

L'objectif de cette synthèse bibliographique, réalisée dans le cadre du projet ISOLHYBBA et de synthétiser les éléments techniques et scientifiques sur l'isolation thermique par l'intérieur (ITI) des murs à colombage.

Dans ce but, cette synthèse s'appuie sur des études de différentes natures, cahiers de recommandation, rapports de projet de recherche, articles scientifiques, normes. Ces études sont basées sur des modélisations numériques, mais aussi sur des retours d'expérience. Les lecteurs souhaitant un complément d'information pourront consulter les documents référencés.

La première partie présente le cadré général de la réhabilitation thermique du bâti ancien. La seconde partie s'intéresse plus spécifiquement aux recommandations que l'on peut trouver dans la littérature pour l'isolation thermique intérieure des murs à pans de bois.

3.1.1. Cadrage de la réhabilitation thermique du bâti ancien

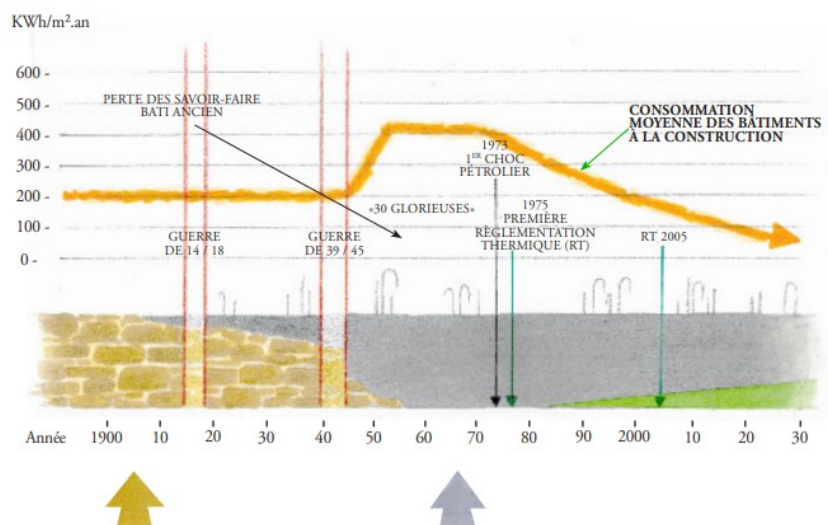
3.1.1.1. Le bâti ancien

Le bâti ancien est défini par une période de construction. Il se distingue du bâti moderne par des techniques de construction différentes, qui lui confère un comportement hygrothermique particulier.

On retrouve dans le bâti ancien, des matériaux naturels et peu transformés. La performance thermique en hiver est souvent médiocre, mais le confort estival est souvent bon (Figure 4).

Les techniques constructives du bâti ancien les plus répandues sont les suivantes :

- Les murs en pierre (selon la nature des pierres utilisées, le comportement hygrothermique est différent),
- Les murs en pisé,
- Les murs à pans de bois,
- Les murs en briques



Au sens réglementaire, le **bâti ancien**, est considéré comme tout bâtiment construit avant 1948.

3.1.1.2. Exigences de la rénovation thermique

Les premiers chocs pétroliers de 1973 ont entraîné la mise en place de la première réglementation thermique des bâtiments. Depuis cette première réglementation, les exigences n'ont cessé d'être renforcées.

Pour ce qui est du parc existant, on retrouve deux exigences, le DPE et la RT existant.

3.1.1.2.1. Le diagnostic de performance énergétique (DPE)

Le DPE, est un outil d'information pour le public, sur la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre d'un logement. Selon les caractéristiques du logement, une consommation d'énergie primaire est estimée. Selon le niveau de consommation, les logements sont classés en 7 étiquettes, de A à G (Figure 5).

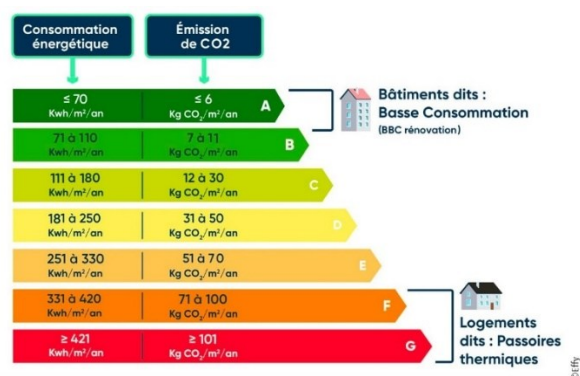


Figure 5 : Étiquette DPE (Effy)

L'étude est obligatoire pour la location ou la vente d'un bien immobilier. L'estimation des consommations peut être faite sur la base d'une analyse du bâti, ou sur l'étude des factures énergétiques.

Depuis 2023, tous les logements consommant plus de 450 kWh/m² ne pourront être mis en location.

En 2025, tous les logements en classe G ne pourront être mis en location.

En 2028, tous les logements en classe G et F ne pourront être mis en location.

En 2034, tous les logements en classe G, F et E ne pourront être mis en location.

Depuis 2023, un audit énergétique (étude beaucoup plus complète qu'un simple DPE) est obligatoire pour la vente des maisons ou immeubles classés F ou G.

3.1.1.2.2. La RT existant

Il existe deux volets de la RT existant : la RT élément par élément et la RT globale, en vigueur selon la typologie du bâtiment.

- RT globale : bâtiment de plus de 1000 m², avec un coût des travaux supérieur à 25 % de la valeur hors foncier du bâtiment, avec une date d'achèvement postérieure à 1948
- RT élément par élément : bâtiment de moins de 1000 m², avec un coût des travaux à supérieur à 25 % de la valeur hors foncier du bâtiment, avec une date d'achèvement postérieure à 1948

Les bâtiments antérieurs à 1948 sont hors cadre des exigences réglementaires de la RT. On retrouve tout de même des bâtiments achevés après 1948, qui ont les mêmes caractéristiques que le bâti ancien.

3.1.1.2.3. Les aides financières à la rénovation

Si la réglementation exclut le bâti ancien, ce dernier peut comme les autres bâtiments existants bénéficier des aides pour la réhabilitation énergétique.

Différentes aides existent pour les travaux de réhabilitation énergétique.

Elles dépendent de la nature des travaux, du gain énergétique et des revenus des ménages.

Des performances minimales sont néanmoins obligatoires **pour être éligible aux aides**. Pour ce qui est de l'isolation intérieure (privilégié dans le bâti ancien pour conserver le caractère patrimonial), **une résistance thermique ajoutée de $3,7 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$** est requise. Cela correspond à 15 cm d'isolant avec une conductivité thermique de $0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Pour l'éco prêt à taux 0, la résistance thermique ajoutée doit être de **$3,7 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$** , soit au-dessus de 11 cm d'isolant en utilisant la conductivité précédente.

3.1.2. La réhabilitation par l'intérieur des murs à pans de bois

3.1.2.1. Des pathologies après réhabilitation thermique

L'isolation par l'intérieur bouleverse les transferts hygrothermiques des murs à colombages. Le mur devient plus froid en hiver, et le point de rosée est décalé vers l'intérieur. Les risques de condensation sont accrus et de nombreuses pathologies peuvent en découler :

Berger et al. (2012) [1] regroupe les pathologies du bâtiment liées à un excès d'humidité en 4 catégories :

- Les altérations dues à l'action propre de l'humidité :
 - Modification des propriétés mécaniques ;
 - Modification des propriétés thermiques ;
 - Variations dimensionnelles ;
- Les altérations dont l'humidité est le vecteur :
 - Le gel des matériaux ;
 - La cristallisation des sels ;
- Les altérations se développant en milieu humide :
 - Les dégradations biologiques ;
 - La corrosion des métaux ;
- La dégradation des ambiances intérieures :
 - La dégradation du confort hygrothermique ;
 - La dégradation de la qualité de l'air.

La plupart de ces pathologies peuvent concerner aussi bien les matériaux isolants que les matériaux constitutifs des murs.

3.1.2.2. Retour d'expérience sur des pathologies

Les pathologies observées dépendent de nombreux critères, tels que l'orientation des façades, le climat, les matériaux utilisés (revêtement et isolant), la qualité de la mise en œuvre, la ventilation du logement, l'utilisation du logement, etc. En revanche, différentes pathologies peuvent être vues aujourd'hui comme un « cas d'école ». Dans un guide édité par le CoDEM [2], sur la réhabilitation des murs à pans de bois, ils présentent trois d'entre elles (Figure 6).

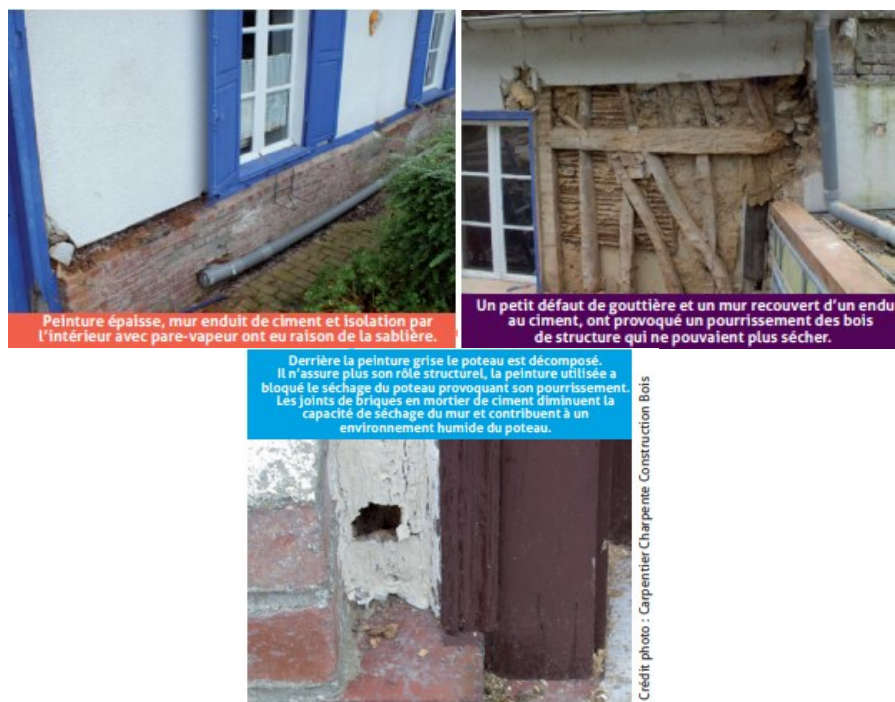


Figure 6 : Pathologies fréquentes sur les constructions à pans de bois (CoDEM, 2014) [2]

3.1.2.3. Recommandations et fiches pour le grand public

3.1.2.3.1. Fiches ATHEBA

Ces fiches sont conçues pour le grand public, souhaitant réaliser des travaux de réhabilitation thermique dans un bâti ancien, les sources ne sont pas indiquées, mais proviennent de retours d'expérience et des pratiques usuelles (Figure 7).

Les préconisations sont les suivantes :

- Diagnostic du bâti avant réhabilitation
- Ajout d'un isolant perméable à la vapeur, d'origine végétale ou animale, d'une épaisseur de 5 à 10 cm
- Film frein vapeur
- Parement intérieur enduit à la chaux, plâtre ou lambris bois

OU

- Paroi intérieure séparée du mur initial
- Lame d'air ventilée sur l'extérieur entre le mur ancien et la cloison isolée

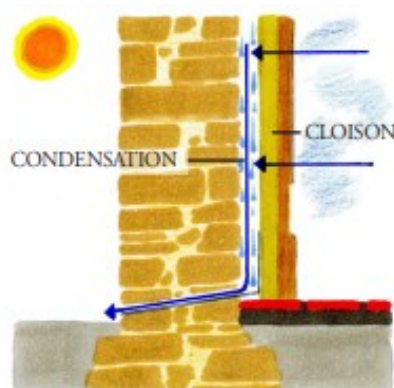


Figure 7 : Solution ATHEBA pour la réhabilitation du bâti ancien

3.1.2.3.2. Guide ABC - Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974 (Cerema)

Le guide sur l'amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1870 à 1974 [3], conseille :

- De s'assurer de la protection extérieure de la paroi contre l'humidité et les pluies battantes ;
- De mettre en place soit un parement peu résistant à la diffusion de vapeur avec une perméabilité croissante vers l'extérieur, soit de proposer un parement très résistant à la diffusion de vapeur avec un pare-vapeur du côté intérieur en respectant la règle dite du «5 pour 1», soit d'utiliser des matériaux auto-régulables tels qu'un frein-vapeur hygro-variable, ou des matériaux à capillarité active.

3.1.2.3.3. Guide de réhabilitation énergétique du bâti picard à pans de bois (CoDEM)

Ce guide 3 vise à proposer des solutions techniques pour la réhabilitation énergétique du bâti à pans de bois. En premier lieu, le guide revient sur le fait impératif de traiter les problèmes d'humidité du mur existant avant d'engager toute opération de réhabilitation. Ils préconisent également de veiller à ne pas avoir de lame d'air derrière les panneaux isolants ou les laines isolantes avec le mur.

Pour l'isolation par l'intérieur, 3 solutions sont proposées en Figure 8. Elles présentent différents niveaux de performance selon l'épaisseur des isolants mis en œuvre : de faibles épaisseurs avec des laines végétales (6 cm) et un frein vapeur hygrovariable, à des épaisseurs supérieures pour les matériaux à capillarité active comme l'isolant minéral cellulaire ou pour les panneaux isolants de fibres de bois avec un frein vapeur.

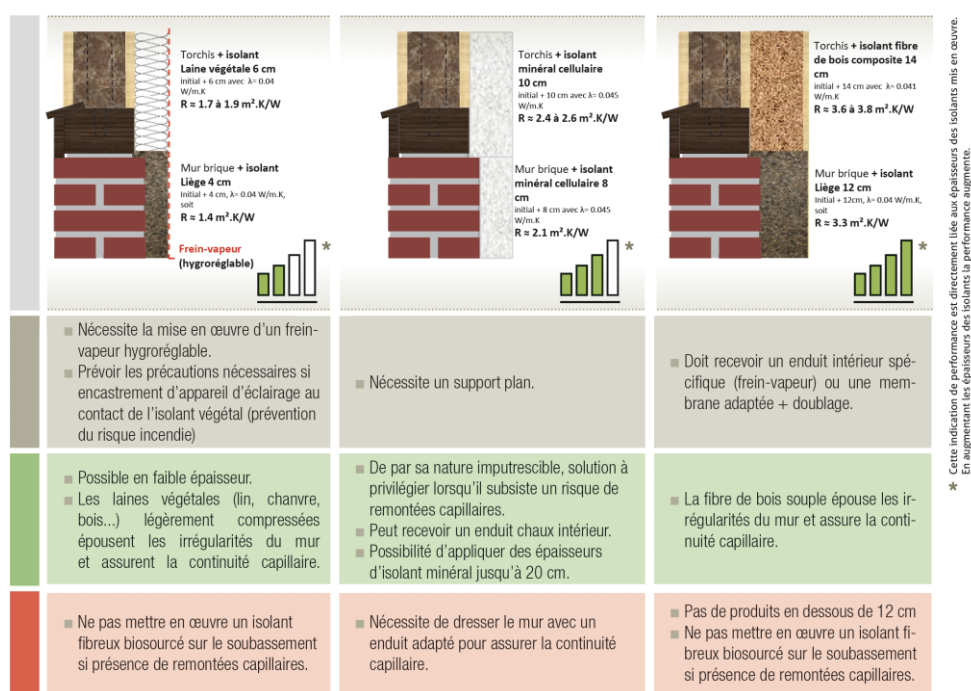


Figure 8 : Solutions CoDEM pour la réhabilitation thermique des murs à pans de bois (Guide Codem, 2014) [2]

Ainsi, les 3 documents cités précédemment convergent sur certains points :

- La nécessité de traiter toutes les pathologies du mur initial avant de procéder à l'isolation.
- Mettre en place une ventilation pour gérer l'humidité générée par l'utilisation intérieure
- Garantir une bonne étanchéité à l'air
- Garantir la capacité de séchage

Cependant,

- Les solutions, à l'exception de la solution CoDem avec isolant fibres de bois, proposent une épaisseur inférieure ou égale à 10 cm, ce qui ne permet pas d'atteindre la résistance thermique nécessaire pour être éligible aux aides financières.
- Seul le guide ABC parle de la protection à la pluie des façades et pointe l'importance de minimiser les sources d'humidité quand les autres documents estiment la présence d'humidité comme inévitable.
- La solution avec la lame d'air ventilé est complexe à mettre en œuvre et relativement risquée.
- Pas de consensus clair sur la valeur Sd du film pare-vapeur (hygrovariable, respect de la règle du 5 pour 1, film à éviter, etc.).

3.1.2.4. Travaux de recherche et recommandations techniques appuyées par des études scientifiques

HYGROBA : Étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes :

Le guide proposé en 2013 par le CETC de Toulouse [4] est un outil d'aide à la décision, permettant une analyse du risque hygrothermique lié à l'isolation par l'intérieur de différentes parois anciennes.

L'étude se base sur des simulations hygrothermiques dynamiques, réalisées avec WUFI.

Le climat intérieur est défini par un ratio W/n (production de vapeur/taux renouvellement de l'air) de 5 g/m³ (moyenne-forte). Il s'agit de conditions d'humidité comparables à une « pièce humide » d'un logement (salle de bain, cuisine), moyennement ventilé.

On retrouve différentes variantes avec des complexes perméables ou étanches, à l'intérieur ou à l'extérieur.

- Revêtement extérieur étanche (E) : enduit ciment
- Revêtement extérieur perméable (P) : enduit chaux
- Revêtement intérieur étanche (E) : laine minérale + Frein vapeur + plaque de plâtre et papier peint vinyle - ($R = 3,75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)
- Revêtement intérieur perméable (P) : ouate de cellulose + Frein vapeur hygrovariable + plaque de plâtre - ($R = 2,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)

La validation des complexes est faite sur la base des critères ci-dessous :

- Critère quantité d'eau (teneur en eau pour éviter le développement de moisissures)
- Condensation interne (humidité relative élevée)
- Capacité de séchage : en cas de désordre, d'infiltration d'air ou d'eau, le mur doit conserver une capacité de séchage

Les résultats sont les suivants (Figure 9) :

- E-E en ITI (i.e. « étanche à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur).
- E-P en ITI (i.e. « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur), risque modéré présent sur les différents postes étudiés : la quantité d'eau présente dans la paroi reste élevée sur 10 ans, sa capacité de séchage en présence d'infiltration est réduite pas l'enduit ciment, et au niveau de la condensation possible.
- P-E en ITI (i.e. « Perméable à l'humidité » coté extérieur + « Étanche à l'humidité » coté intérieur). La capacité de séchage est réduite dans la configuration à cause de la faible capillarité de la laine de roche et la forte résistance à la diffusion du pare-vapeur.

Murs en pan de bois et torchis		Quantité d'eau	Capacité de séchage	Condensation
Base				
				
				
				
				
				

Figure 9 : Tableau synthèse résultat de l'étude HYGROBA sur les pans de bois

Enertech : Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien :

Le guide rédigé par Enertech SCOP [5] est une synthèse de nombreuses simulations WUFI Pro, WUFI 2D et d'une étude bibliographique, pour proposer des solutions de réhabilitation selon le type de bâti. Le guide a étudié la réhabilitation des murs à pans de bois, en étudiant différents isolants (ouate de cellulose, laine minérale et béton cellulaire (Multipor, Ytong)).

Le climat extérieur est celui de Nancy. Orientation Nord-ouest, avec un enduit à la chaux extérieur d'absorptivité $A = 3 \text{ kg.m-2h-1/2}$. La validation du complexe est faite selon le critère suivant : teneur en eau du bois inférieure à 20 %. Le point étudié se situe dans le bois à l'interface entre le pan de bois et l'isolation.

Le document donne des objectifs sur les points de convergence avec les documents vus ci-dessus :

- Ventilation mécanique contrôlée, avec un débit minimal de 0,6 vol/h,
- Étanchéité à l'air soigné, avec un n50 maximum de 3 vol/h sous 50 Pa,
- Pas de remontée capillaire, ou traité avant la mise en place de l'isolation,
- Proscription des enduits ciment, et suppression de tous les éléments entravant la diffusion de vapeur (papier peint vinyle, toile de verre, etc.),

Les recommandations sont les suivantes :

- Isolant de préférence laine minérale, étude réalisée avec une résistance thermique jusqu'à $R = 4,7 \text{ m}^2.\text{K/W}$ (soit 15 cm d'épaisseur pour une GR32).
- L'utilisation d'isolants hygroscopiques apparaît plus risquée avec une accumulation d'humidité un peu plus importante à l'interface pan de bois-isolant,
- Frein vapeur hygrovariable à fort S_d (variable jusqu'à 26m), à cause du pan de bois, peu perméable à la vapeur cotée extérieur,
- Possibilité d'isolant type Multipor (béton cellulaire du fabricant Ytong), sans pare-vapeur, peut être intéressant car ouvert à la diffusion de vapeur et capillaire. Point de vigilance : le contact doit être parfait entre l'isolant et le mur existant pour assurer la continuité capillaire,
- Débord de toiture pour protection contre la pluie battante

Concernant la conclusion un peu plus défavorable pour les isolants hygroscopiques, l'étude ayant été menée que sur 4 ans, sans source additionnelle d'humidité, elle est relativement défavorable pour les matériaux hygroscopiques. Leur inertie hydrique apparaît parfois comme un avantage pour amortir des sources d'humidité additionnelles et cela s'observe sur les temps plus longs, lorsque l'humidité de départ est partie.

Il est à noter que l'étude la plus récente est celle d'Enertech. Elle reprend d'ailleurs des éléments du projet Hygroba, notamment pour les données matériaux. On retrouve un point de divergence, entre ces deux études notamment sur les données d'entrée du climat intérieur :

- Le projet Hygroba prend des hypothèses très défavorables, avec un climat de pièce humide
- L'étude d'Enertech utilise un climat standard d'habitation.

L'étude d'Enertech rejoint le guide ABC sur la nécessité de diminuer au maximum les sources d'humidité (protection pluie battante, étanchéité à l'air soignée, ventilation).

Une réhabilitation très performante sur le bâti ancien semble être possible.

À noter que l'orientation des études Enertech est au Nord-Ouest et elle n'intègre pas de source supplémentaire d'humidité provenant par exemple d'un défaut de l'enduit extérieur. Or, la pluie battante, dans le climat Nancéen, est orientée Sud-Ouest. C'est donc une hypothèse potentiellement plus favorable qui est prise sur ce sujet d'étude, si l'on considère l'importance de l'apport d'eau par la pluie battante sur un mur plus froid (après isolation).

Autres travaux Outre-Rhin :

- Kunzel et Holm (2009)

L'étude de Kunzel et Holm (2009) [6] compare la capacité de séchage des murs à pans de bois avant (Figure 10) et après rénovation thermique. Ils préconisent sur la base de simulations hygrothermiques avec Wufi et de plusieurs études :

- Coté intérieur, les auteurs expliquent qu'il est nécessaire de trouver un compromis entre la prévention de la condensation dans la masse et l'optimisation du potentiel de re-séchage du mur. Même avec les recommandations de la norme allemande DIN 4108-3 8 qui prescrit une plage de résistance à la diffusion très étroite ($1,0 \text{ m} \leq s_d \leq 2,0 \text{ m}$) pour l'isolation intérieure et le pare-vapeur, le risque de maintien d'une humidité trop haute est élevé. Le potentiel de séchage vers l'intérieur semble pouvoir être maintenu en appliquant un pare-vapeur hygrovariable ou en utilisant un isolant à capillarité active et sans pare-vapeur.
- Coté extérieur, l'application d'une isolation thermique intérieur réduit forcément la capacité de séchage du mur en le rendant plus froid. Il n'y a pas de solution sur ce constat.

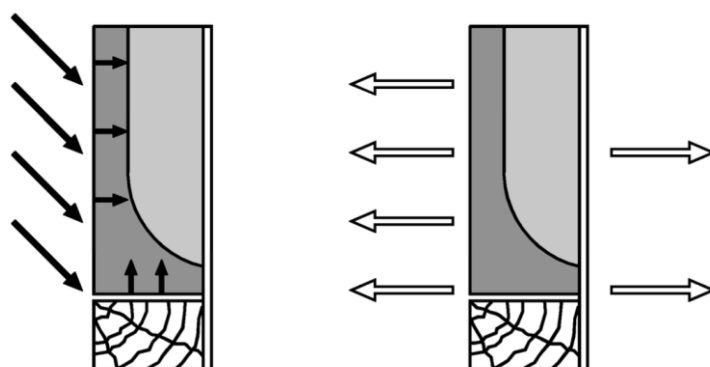


Figure 10 : Pénétration de l'eau de pluie et potentiel de séchage par diffusion de vapeur à l'extérieur comme à l'intérieur d'un mur à pans de bois [6].

- Fiche WTA 9

Les fiches WTA éditées par les physiciens du bâtiment donnent les règles de l'art à appliquer en Allemagne dans le secteur de la construction. La série DIN des normes Allemande consacre une dizaine de cahier à la réhabilitation des maisons à colombage [7] [8]. Une présentation lors de la journée technique réalisée sur le campus bois d'Épinal le 26 sept. 2024 [9] par Nadja Schultze-Rémond, portait justement sur ce sujet et vient compléter les éléments portés ci-dessous.

Dans la fiche WTA de la série [7] [8] portant sur l'isolation thermique par l'intérieur, la problématique de garder la capacité de re-séchage vers l'extérieur et l'intérieur du mur après réhabilitation est une exigence forte (Figure 9). Elle recommande de limiter les apports d'humidité importants, tels que la pluie ramenée sur la façade par le vent (i.e. pluie battante) et attire l'attention sur les jonctions entre le matériau de remplissage et les pans de bois qui sont en général des zones où l'humidité peu pénétrer en profondeur dans la paroi à cause des retraits différentiels de ces matériaux. Plusieurs règles sont ainsi préconisées :

- limiter l'apport d'humidité par le vent et la pluie battante - le colombage ne peut pas rester apparent là où il y a une sollicitation de pluie battante. Une protection

constructive contre la pluie est nécessaire (débord de toit, bardage, crépis sur la façade, etc.). Dans ce sens, il ne faut pas enlever les protections extérieures en place lors de la réhabilitation et les réhabiliter si cela est nécessaire. Pour des façades non orientées vers les intempéries, le colombage apparent est possible mais la capacité de séchage doit être préservée. L'enduit extérieur appliqué sur le matériau de remplissage doit être sans peinture et avec une absorptivité modérée, A entre 0,5 à 1 kg/ (m²h0.5) selon EN ISO 15148. Des valeurs inférieures de A doivent être évitées afin de ne pas induire un ruissellement de l'eau de pluie qui serait conduit vers les jonctions remplissage-pans de bois. Aussi, une étanchéité au vent est nécessaire par l'ajout d'un crépi continu soit coté extérieur ou dans le cas d'un colombage apparent, coté intérieur.

- capacité de re-séchage élevée - L'utilisation de matériaux étanches est à proscrire. Le choix des matériaux de réhabilitation doit être ouvert à la diffusion pour favoriser le séchage vers l'intérieur et l'extérieur. Ouverture à la diffusion de la vapeur d'eau vers l'intérieur avec une ITI (isolant + pare vapeur) ayant une valeur Sd entre 0,5 à 2 m, avec une limite basse qui se rapproche de 2 m plus l'épaisseur d'isolant est importante.
- Éviter tout vide d'air entre l'isolation intérieure ajoutée et le mur- Il faut en effet un contact direct entre le mur et l'isolant pour éviter une circulation d'air par tirage thermique. Si nécessaire ajouter une couche d'égalsation sur la surface intérieure du mur, en argile ou autre. Les enduits en plâtre doivent être retirés avant l'ajout de l'ITI.
- Au-delà d'une résistance thermique de 0,8 m².K/W en ITI, il est nécessaire de réaliser une étude hygrothermique selon la norme EN ISO 15026.

3.1.3. Bilan de l'état de l'art de l'ITI en bois

L'ensemble des documents, montre que l'isolation par l'intérieur des murs à pans de bois peut conduire à une accumulation d'humidité, pouvant faire apparaître différentes pathologies.

Des grands principes peuvent être dégagés à savoir :

- L'isolation doit impérativement être faite sur un mur sain : si le mur présente des signes de pathologies, un traitement est nécessaire au préalable.
- La réhabilitation thermique doit laisser le mur très ouvert à la diffusion de vapeur. Utilisation d'un frein-vapeur hygrovariable ou d'isolants à capillarité active et dans ce cas sans pare vapeur.
- L'étanchéité à l'air doit être soignée, ainsi que l'étanchéité au vent. Une attention particulière doit-être consacrée à la réhabilitation et les protections à mettre en œuvre sur la façade exposée à la pluie battante.
- Une ventilation mécanique contrôlée doit permettre d'évacuer l'excès d'humidité généré par l'occupation intérieure.

Ensuite on retrouve des visions qui s'opposent :

- D'un côté, une vision défavorable mais plus « sécuritaire », qui estime qu'il y aura forcément des infiltrations d'humidité. Cela conduit à réduire l'épaisseur d'isolant dans le mur, pour éviter de trop refroidir le mur existant. Les matériaux hygroscopiques seront privilégiés pour amortir dans le temps les variations d'humidité. Cela limite les performances de la réhabilitation, et peut contraindre l'inéligibilité aux aides financières.
- De l'autre côté, une vision favorable mais plus « risquée », qui estime qu'une bonne mise en œuvre permettra de limiter fortement les apports humidité dans la paroi, et qu'il sera donc possible d'obtenir une résistance thermique supérieure à 4 m².K/W. Les matériaux non-hygroscopiques sont privilégiés pour éviter l'effet de rétention d'humidité. Cela peut paraître risqué en cas de mauvaise mise en œuvre, avec une accumulation d'humidité dans un mur plus froid.

De nombreuses études citées précédemment se basent sur le modèle numérique, WUFI. Néanmoins sa capacité à simuler des transferts hygrothermiques dans les matériaux du bâti ancien, encore mal caractérisés, peut être affectée. Le manque de propriétés hygrothermiques disponibles sur ces matériaux,

l'évolution de ces propriétés avec le temps et les agressions climatiques, la méconnaissance des conditions initiales de départ pour la simulation peuvent nuire considérablement au potentiel prédictif du modèle. Aussi, il apparaît difficile à ces outils numériques de prédire les transferts hygrothermiques au niveau des jonctions bois-torchis ou bois -enduit où les retraits différentiels de ces matériaux peuvent permettre à l'eau de pénétrer profondément dans la paroi. Le projet ISOLHYBBA cherche à répondre à une partie de ces questions, par une confrontation entre expérience et modélisation, en climat contrôlé et sur site.

3.2. Caractérisation des matériaux utilisés dans le projet

Malgré la quantité de données de plus en plus importantes sur les caractéristiques hygrothermiques des matériaux de construction, les matériaux du bâti ancien restent encore assez peu caractérisés comme cela a été encore observé dans le projet Smart-Reno 2019-2022 (<https://smart-reno.univ-lr.fr/>).

Ainsi, il a été nécessaire de caractériser certaines des propriétés des matériaux utilisés dans cette paroi dans le projet BAUCH (torchis classique et torchis allégé) ainsi que dans le projet ISOLHYBBA pour le terre-chanvre qui a été ajouté. Pour les autres matériaux des valeurs venant de la littérature ou des fiches techniques ont été utilisées. Sont présentées ci-dessous les mesures effectuées dans le cadre de ce projet sur le terre-chanvre, fermacell, combijute, terre chanvre et enduit terre.

3.2.1. Mesure des propriétés thermophysiques

Pour alimenter le code de calcul, il est nécessaire d'introduire les caractéristiques thermiques et hydriques des matériaux utilisés. Une partie des mesures a été réalisée au CERTES à l'UPEC dans le cadre d'un stage Master financé par le projet ISOLHYBBA. Différentes techniques et dispositifs ont été utilisés afin de s'adapter à la nature et aux dimensions des matériaux à caractériser. Les mesures des propriétés thermophysiques (conductivité, diffusivité, chaleur massique) ont été déterminées avec deux dispositifs : Hot-Disk (Figure 11) et l'Isomet (Figures 12). Cela a permis d'adapter le bon dispositif à la taille et à la nature de l'échantillon à caractériser. Les caractéristiques thermiques de tous les matériaux utilisés dans le mur réhabilité de la maison à Puiseux-en-Bray sont indiqués dans le tableau 1.

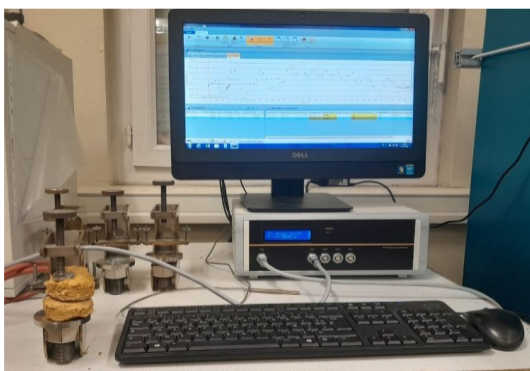


Figure 11 : Dispositif de mesure Hot Disk (CERTES)

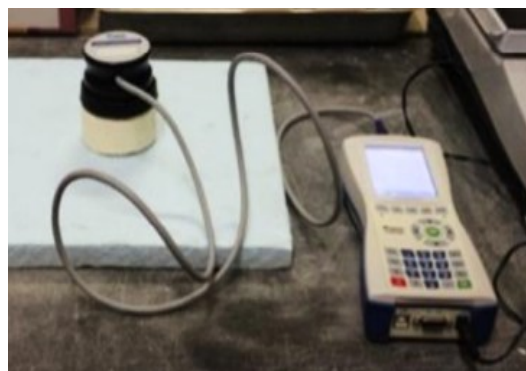


Figure 12 : Dispositif Isomet (CERTES)

De son côté, le LERMAB a également caractérisé certaines des propriétés des matériaux utilisés dans la paroi construite dans le projet BAUCH (torchis classique et torchis allégé) ainsi que dans le projet ISOLHYBBA pour le terre-chanvre. Pour les autres matériaux des valeurs venant de la littérature ou des fiches techniques ont été utilisées. Pour ce faire, lors de la pose de l'isolation sur la paroi test qui a été introduite par la suite dans l'enceinte bi-climatique, des cylindres de l'isolant intérieure base de terre-chanvre ont été réalisés en tachant d'adopter la même pression pour le compactage (Figure 13).



Figure 13 : Dispositif Hot Disk pour la mesure des propriétés thermophysiques de terre-chanvre (LERMAB)

3.2.2. Mesure des propriétés hydriques

3.2.2.1. Isotherme de sorption

Le CERTES de l'université Paris Est Créteil (UPEC) a utilisé la méthode de sorption dynamique de vapeur (DVS) pour caractériser les isothermes d'adsorption et de désorption complètes de matériaux utilisés dans le projet ISOLHYBBA. L'appareil est un Vsorp Plus (DVS multi-échantillons) de la société ProUmid, connecté à de l'air comprimé. La résolution de l'appareil varie de 10 μg à 110 g. Les figures 14 et 15 montrent le DVS et son carrousel. Cet appareil permet un contrôle précis de la température (de 15°C à 40°C) et de l'humidité relative (de 0 % à 90 %) autour des échantillons, placés sur un carrousel rotatif. Les échantillons, mesurant environ 2 cm x 2 cm x 2 cm, ont été pesés à intervalles réguliers toutes les 10 minutes. L'humidité relative a été progressivement augmentée, puis diminuée de 0 % à 90 % avec un pas de 10 %. Une étape était considérée comme terminée lorsque le changement de masse reste inférieur à 0,0005 % par minute (EN ISO 12571).

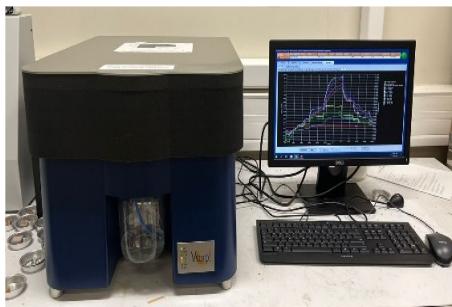


Figure 14 : Dispositif DVS pro Humid



Figure 15 : Carrousel du DVS avec des échantillons

De son côté, le LERMAB a utilisé le dispositif V-GA (InstruQuest Inc., Coconut Creek, USA) pour mesurer l'isotherme de sorption. Ce dispositif permet le suivi de la masse d'un échantillon jusqu'à 100 g (typiquement ici environ 30 g d'échantillon), qui est placée dans une enceinte climatique contrôlée en température et en humidité relative. Le système utilise une semi-microbalance (CPA 225D, de Sartorius, Goettingen, Allemagne). L'échantillon est placé dans une nacelle qui est suspendue à la balance qui est en dehors de l'enceinte. Le passage de la paroi se ferme avec un diaphragme en iris autour de la tige de liaison balance-nacelle. Les conditions dans l'enceinte sont contrôlées en température et en humidité via un module de génération d'humidité (HumiSys LF, de InstruQuest Inc., Coconut Creek, USA) et un système de chauffage pour maintenir la totalité de l'enceinte dans des conditions isothermes. Les sondes d'humidité relative et de température utilisées pour le contrôle sont placées dans l'enceinte près de l'échantillon. Une répétition a été réalisée. La température dans l'enceinte a été maintenue constante à 25°C en suivant la séquence d'humidité relative suivante : 0 %-15 %-30 %-45 %-60 %-75 %-90 %.

3.2.2.2. Facteur de résistance à la diffusion

Cette propriété a été mesurée au LERMAB par la méthode de la coupelle en utilisant le dispositif GraviTest®. L'avantage de ce dernier est l'automatisation de l'essai avec un passeur d'échantillon le suivi de la masse (Figure 16). La méthode de la coupelle consiste à exposer l'échantillon à un gradient de pression de vapeur d'eau constant grâce à une solution saline saturée à l'intérieur de la coupelle (ici une solution de NaCl) et en contrôlant la température et l'humidité relative à l'extérieur de la coupelle en plaçant celle-ci dans la chambre climatique de l'appareil (ici ambiance contrôlée à 25°C et 40 % d'humidité relative). La différence de pression de vapeur engendre un flux de vapeur à travers l'échantillon allant de la haute à la basse pression de vapeur. L'évaluation de ce flux se fait par des pesées régulières de l'assemblage.

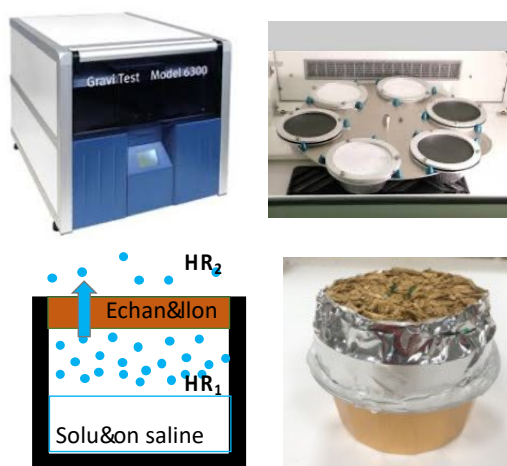


Figure 16 : Gravitest et son carrousel, et coupelle contenant une solution saline sur laquelle est scellé l'échantillon

3.3. Caractéristiques des matériaux utilisés

Les résultats des mesures des propriétés de transfert de chaleur et de masse pour chaque matériau utilisé dans cette étude sont donnés dans les Tableau 1 et Tableau 2. Les valeurs des grandeurs indiquées dans le Tableau 2 qui n'ont pas été caractérisées par le LERMAB sont indiquées par la lettre W, lorsqu'elles viennent de la base de données du logiciel WUFI, ou par la lettre (F), lorsqu'elles viennent du fabricant.

De même, les courbes de sorption et désorption mesurées au CERTES sont reportées en Figure 1 pour les différents matériaux (combijute, terre chanvre, torchis, fermacell et l'enduit en terre).

Matériel	Masse volumique ρ (kg m^{-3})	Conductivité thermique λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Chaleur massique C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Fermacell	1100	0,32	1150
Combijute	37	0,04	2300
Terre chanvre	385	0,085	900
Enduit terre	2600	0,15	900
Torchis	905	0,59	1000
Chaux chanvre	1510	0,70	1000

Tableau 1 : Caractéristiques thermophysiques des matériaux utilisés.

Lightweight Cob					Value	Source	
Thermal conductivity λ (W/(m.K))					0.28	(W)	
Water vapour resistance factor μ (-)					5 ¹		
Water absorption coefficient A_w (kg/m ² /s ^{1/2})					0.05		
Dry bulk density ρ (kg/m ³)					905		
Sorption isotherm at 25°C							
RH(%)	0	15	30	45	60	75	90
EMC(%) – Adsorption	0	0.48	1.03	1.45	1.93	2.70	3.73
Standard Cob					Value	Source	
Thermal conductivity λ (W/(m.K))					0.83	(W)	
Water vapour resistance factor μ (-)					8.7		
Water absorption coefficient A_w (kg/m ² /s ^{1/2})					0.05		
Dry bulk density ρ (kg/m ³)					1635		
Sorption isotherm at 25°C							
RH(%)	0	15	30	45	60	75	90
EMC(%) – Adsorption	0	0.49	0.79	1.10	1.46	1.93	2.54
Indoor Plaster					Value	Source	
Thermal conductivity λ (W/(m.K))					0.59	(W)	
Water vapour resistance factor μ (-)					6.5	(W)	
Water absorption coefficient A_w (kg/m ² /s ^{1/2})					0.05		
Dry bulk density ρ (kg/m ³)					1495		
Sorption isotherm at 25°C							
RH(%)	0	15	30	45	60	75	90
EMC(%) – Adsorption	0	0.382	0.618	0.828	1.080	1.504	2.286
– desorption	-0.009	0.416	0.686	0.966	1.306	1.736	2.286
Outdoor Plaster					Value	Source	
Thermal conductivity λ (W/(m.K))					0.7	(W)	
Water vapour resistance factor μ (-)					7.7	(W)	
Water absorption coefficient A_w (kg/m ² /s ^{1/2})					0.002		
Dry bulk density ρ (kg/m ³)					1510		
Sorption isotherm at 25°C							
RH(%)	0	15	30	45	60	75	90
EMC(%) – Adsorption	0	0.167	0.239	0.296	0.376	0.64	1.504
– desorption		0.176	0.273	0.400	0.579	0.87	1.504
Oak					Value	Source	
Thermal conductivity λ (W/(m.K))					0.21		
Water vapour resistance factor μ (-)					309-		
Water absorption coefficient A_w (g/m ² /h ^{1/2})Dry					61		
bulk density ρ (kg/m ³)					-		
Sorption isotherm at 25°C					685		
RH(%)	0	15	30	45	60	75	90
EMC(%) – Adsorption	0	3.13	5.23	7.38	9.93	13.57	19.67
– desorption		3.99	6.71	9.53	12.59	15.94	19.67
Hemplime					Value	Source	
Thermal conductivity λ (W/(m.K))					0.11		
Water vapour resistance factor μ (-)					2.3		
Water absorption coefficient A_w (g/m ² /h ^{1/2})Dry					-		
bulk density ρ (kg/m ³)					385		
Sorption isotherm at 25°C							
RH(%)	0	15	30	45	60	75	90
EMC(%) – Adsorption	0	1.34	2.01	2.70	3.65	4.93	7.10
– desorption		1.95	2.83	3.77	4.81	6.09	7.10

¹ Valeur prise par défaut, entre le torchis classique et le terre chanvre

Combijute					Value			Source
Thermal conductivity λ (W/(m.K))					0.04			(F)
Water vapour resistance factor μ (-)					1.5			(F)
Water absorption coefficient Aw					-			
Dry bulk density ρ (kg/m³)					39			(F)
Sorption isotherm at 25°C								
RH(%)	0	15	30	45	60	75	90	
EMC(%) – Adsorption	0	2.68	4.47	6.02	7.99	12.4	21.0	
– desorption		3.21	5.31	7.42	9.98	13.8	21.0	

Tableau 2 : Synthèse des propriétés hygrothermiques des matériaux des parois étudiées

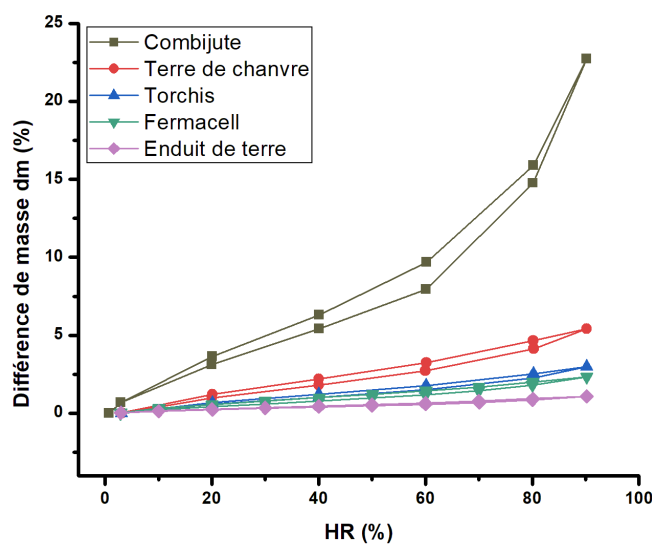


Figure 1 : Courbes de sorption et désorption du Fermacell, combijute, terre chanvre et torchis

Il est clair que le Combijute présente une forte capacité à absorber l'humidité, pouvant atteindre jusqu'à 23 % de sa masse entre 0 % et 90 % d'humidité relative. En revanche, la seconde solution d'isolation, à base de terre-chanvre, montre une augmentation moins importante, atteignant environ 4 % de sa masse à 90 % d'humidité relative.

Cela indique que le Combijute possède une capacité d'absorption et de désorption de l'humidité nettement plus élevée que celle du matériau terre-chanvre. Enfin, aucun des deux matériaux ne présente un effet d'hystérésis très marqué.

3.4. Étude en laboratoire du mur à colombage

Le dispositif instrumental utilisé dans le cadre du projet ISOLHYBBA est semblable au projet BAUCH sur lequel a travaillé le présent consortium. Dans le cadre du projet BAUCH, un mur à pans de bois a été construit, testé. Dans le projet ISOLHYBBA, il a été nécessaire de mettre en œuvre une solution ITI avec des isolants géo et biosourcés pour le projet ISOLHYBBA en particulier deux solutions. La première in ITI à base de combijute et la deuxième un autre ITI à base de terre chanvre. Toutefois, d'autres tests ont été réalisés dans le cadre d'une autre étude et avec les mêmes parois utilisant un ITI à base de laine de bois. Ces résultats seront parfois rapportés dans ce rapport pour illustrer le comportement de la paroi avec un autre isolant que ceux utilisés dans le projet ISOLHYBBA.

3.4.1. Mur à colombage initial

La réalisation a été effectuée par l'entreprise Isa & Johann Degraeve (Puisseux en Bray, France) lors du projet BAUCH avec deux interventions, l'une fin novembre 2018 et l'autre mi-février 2019. La première intervention sur deux jours, a permis la réalisation de la paroi ci-dessous. Pour réduire le temps

d'intervention, le cadre en bois avait été réalisé au préalable (sur la Figure 18). Le bois utilisé est du chêne hormis les contrelattes qui sont en châtaignier.



Figure 2 : États de réalisation du mur à colombage (LERMAB)

Afin que l'étude de la paroi soit suffisamment représentative de celle des bâtiments à colombage nous avons divisé dans le projet BAUCH la paroi en 4 parties : 2 parties avec pans de bois apparents et 2 parties avec pans de bois semi-apparents (Figure 19). Pour chaque partie, 2 torchis ont été étudiés, un torchis classique (parties basses du mur) et un torchis allégé (parties hautes du mur).

Les différences entre les structures apparentes (les différentes épaisseurs des matériaux, la trame des éléments de structure ont été définies en collaboration avec le constructeur, l'entreprise Isa & Johann Degrave. Les dénominations des 4 zones d'études au niveau de la paroi sont présentées sur la figure.

Pour étudier la paroi dans sa totalité, une série de capteurs a été installée au milieu de chaque zone. Les capteurs sont placés à différentes épaisseurs dans la paroi afin d'obtenir des profils d'humidité relative et de température.

Les capteurs sont placés selon les dispositions des Figure 21 et Figure 22 :

- 1 capteur à la surface du côté extérieur
- 1 capteur à l'interface torchis/enduit extérieur
- 1 capteur à l'interface lattage/torchis
- 1 capteur au milieu du torchis
- 1 capteur à l'interface torchis/enduit intérieur
- 1 capteur à la surface du côté intérieur

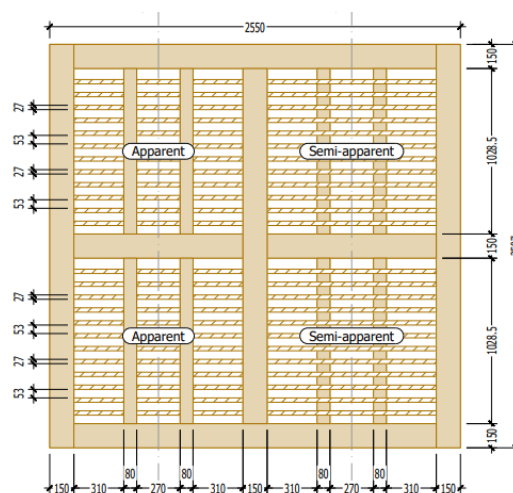


Figure 3 : Structure de la paroi globale

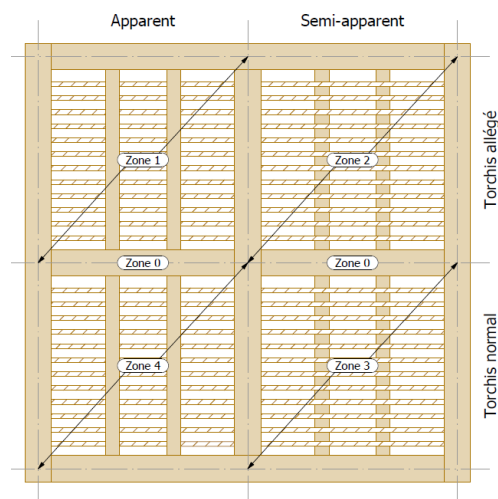


Figure 4 : Dénomination des 4 zones d'études

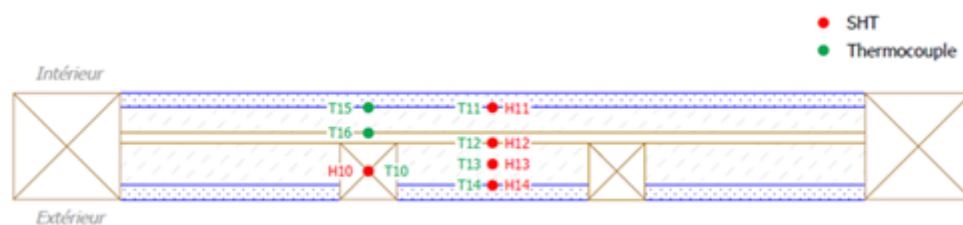


Figure 5 : Disposition capteurs structures apparentes

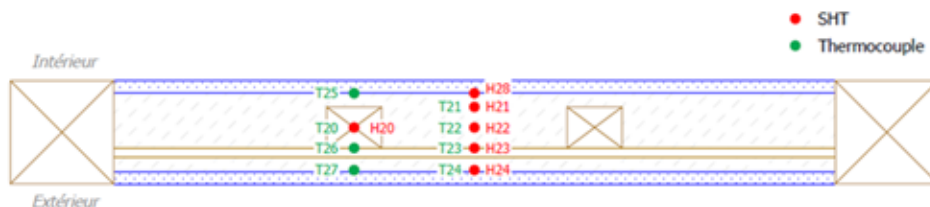


Figure 6 : Disposition capteurs structures semi-apparente

Les capteurs utilisés sont des sondes hygrothermiques de type SHT75 (Sensirion AG, Staefa, Switzerland). Ces sondes permettent de mesurer la température et l'humidité relative de l'endroit où elles sont situées. La partie capacitive de la sonde utilisée pour la mesure d'HR ne pouvant pas être en contact avec de l'eau liquide, un manchon protecteur en film pare-pluie (Solitex fronta Quatro, pro clima, Schwetzingen, Allemagne) a été placé autour de la tête de la sonde pour la protéger de l'humidité initiale importante du torchis, du torchis allégé ou encore de l'isolation rapportée par la suite le terre-chaux. La valeur S_d de cette membrane est de 0.05 m.

3.4.2. Ajout de l'isolation thermique intérieure (ITI)

Une pré étude numérique avec l'aide de Wufipro (Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP), Allemagne) a été menée en amont de la pose de l'ITI afin de voir le bouleversement induit au niveau des transferts hygrothermiques par celle-ci et d'aider le consortium dans le choix de l'épaisseur d'isolant à appliquer, le choix du S_d du pare-vapeur et la position des sondes dans les nouvelles couches ajoutées. Après concertation avec la société Degraeve, et de son expérience dans la réhabilitation du bâti ancien ainsi que les matériaux utilisés habituellement, 2 configurations ont été retenues :

- Une isolation en laine de jute, avec la laine combijute de Thermohanf (150 mm) ainsi qu'un pare-vapeur hygrovariable intello de Proclima (Figure 23)

- Un torchis isolant terre chanvre, réalisé par Mr Degrave, avec un enduit terre (Figure 24)



Figure 7 : Mise en œuvre de l'isolation en laine de jute, avec ajout du pare-vapeur Intello (ProClima) et de plaques de Fermacell



Figure 8 : Mise en œuvre de l'isolation terre/chanvre, avec l'ajout d'un lattage pour le support de l'enduit intérieur

Le terre-chanvre appliqué a été réalisé en malaxant 40 kg de chènevotte de chanvre avec 80 litres d'argile (limon) en poudre et 55 litres d'eau. L'humidité du terre chanvre au moment de la mise en œuvre sur la paroi a été mesurée par double pesée. L'humidité était de 32.5 % sur masse sèche, soit environ 125.1 kg eau /m³ sec. Le terre chanvre est compacté lors de la pose en appliquant une pression manuelle qui comprime le terre-chanvre entre le mur à pans de bois et le lattage. La masse volumique après séchage du terre chanvre ainsi compacté a été estimée à environ 385 kg/m³.

3.4.3. Période de séchage de la solution ITI terre -chanvre

Après la mise en place de l'isolant de terre-chanvre, son séchage a nécessité environ 5 mois pour que l'humidité relative (HR) de toutes les sondes au sein de la paroi tende vers celle mesurée à l'extérieur (HR env. 60-70 %).

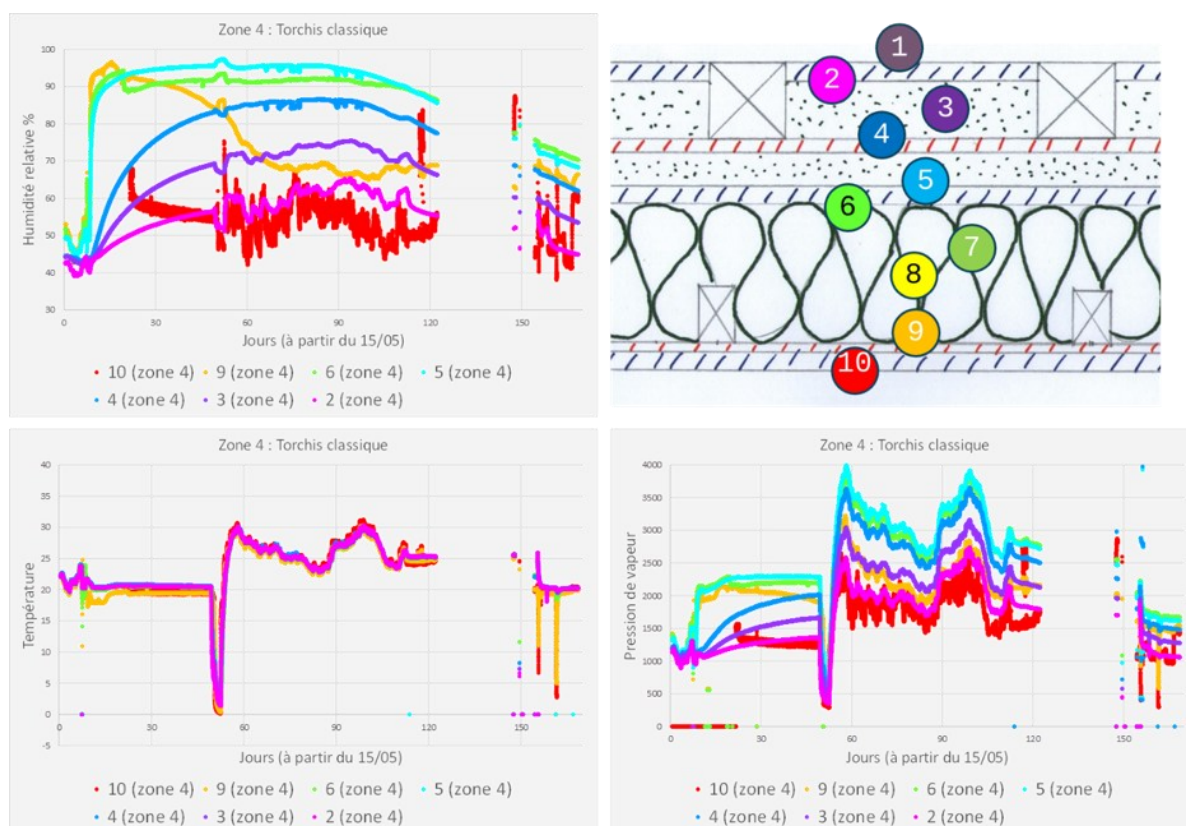


Figure 9 : Évolution de l'HR (a), la température (b) au niveau de la surface (sonde 1-rouge), et de part et d'autre de la couche de terre-chanvre (sonde 2-orange coté intérieur) et sonde 5 -vert fluo coté extérieur) de la paroi avec torchis classique.

Le séchage de l'isolant terre-chanvre, contribue à la ré-humidification du colombage existant, avec une augmentation de l'HR dans le torchis classique (Figure 25). Les propriétés hygroscopiques du torchis, et le temps de diffusion de l'humidité dans l'épaisseur du torchis déphasent l'augmentation de l'humidité relative. Un maximum d'humidité relative est atteint au bout de deux mois, à 80 %, puis il sèche.

Le séchage du terre-chanvre pouvant être assez bien simulé par le code, il est intéressant d'utiliser Wufi pour regarder l'influence de la période de pose du terre-chanvre sur la durée de séchage. Le climat choisi est le climat Nancéen, avec une orientation Nord, orientation sans apport de pluie battante.

Trois cas sont étudiés :

- Pose en avril, climat intérieur contrôlé (20°C / 40 % HR)
- Pose en avril, climat intérieur variable calculé selon la norme (WTA 6-2)
- Pose en septembre, climat intérieur contrôlé (20°C / 40 % HR)

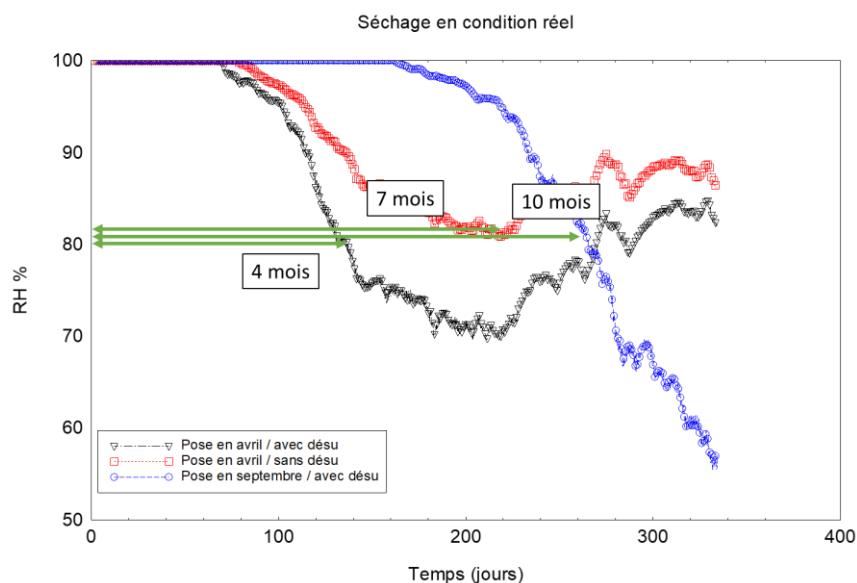


Figure 10 : Utilisation du modèle WUFI pour modéliser le séchage du terre-chaivre au niveau de la jonction isolant-torchis pour trois scénarios de pose.

Les résultats présentés en figure 26 montrent que pour un séchage rapide, la mise en place d'un climat intérieur contrôlé en humidité, par exemple avec l'aide d'un déshumidificateur, est préférable. Mais, dans le cas d'une pose en hiver, même en contrôlant le climat intérieur, le séchage du mur est très long et passe de 4 mois à 10 mois de séchage pour un retour en dessous de 80 % de HR.

3.4.4. Comportement hygrothermique du mur avec ou sans ITI et confrontation à la modélisation Wufi

La partie suivante présente à titre d'exemple les résultats obtenus sur le mur à pans de bois avec torchis classique, puis ceux obtenus après isolation avec le terre-chaivre. Les courbes simulées apparaissent également sur ces mêmes figures. Les résultats sur le mur isolé avec l'isolant en fibres de jute et de chanvre sont présentés dans l'Annexe A. Les propriétés présentées dans le tableau 5 sont utilisées comme données d'entrée du modèle Wufi. Les données de température et d'humidité mesurées au voisinage de la surface sont utilisées comme conditions aux limites pour le modèle.

L'ensemble des données collectées sur les deux types de torchis et les deux types d'isolant ont été rassemblées dans tableur et transmis au CERTES pour analyse avec le modèle qu'ils ont développé dans le cadre des projets BAUCH et d'ISOLHYBBA.

3.4.4.1. Analyse du comportement du mur nu (torchis classique- Zone 4)

Sur les premières simulations, les comparaisons sont effectuées sur les températures mesurées en différents points selon l'épaisseur de la paroi (Figure 11).

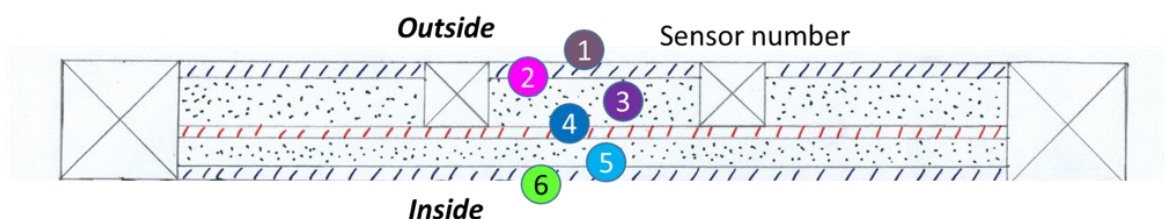


Figure 11 : Numérotation des sondes dans l'épaisseur de la paroi en correspondance aux courbes des figures ci-après. Leur position est respectivement pour P1, P2, ..., P6, à 0, 20, 50, 80, 130, 150 mm par rapport à la surface de l'enduit extérieur

Analyse de la température en différents points selon l'épaisseur :

Il n'y a pas de différence notable entre la modélisation et les données expérimentales concernant le transfert de chaleur sur la Figure 12 et Figure 13. Les caractéristiques des matériaux utilisées dans la modélisation semblent pouvoir conférer au modèle un bon potentiel prédictif.

Il est à noter tout de même une différence d'amplitude au niveau de la sonde P3. La température est plutôt semblable dans le cas du mur avec un torchis allégé (Annexe B). Le décalage de la sonde P3 peut être expliqué par un décalage entre la position théorique de la sonde et sa position réelle.

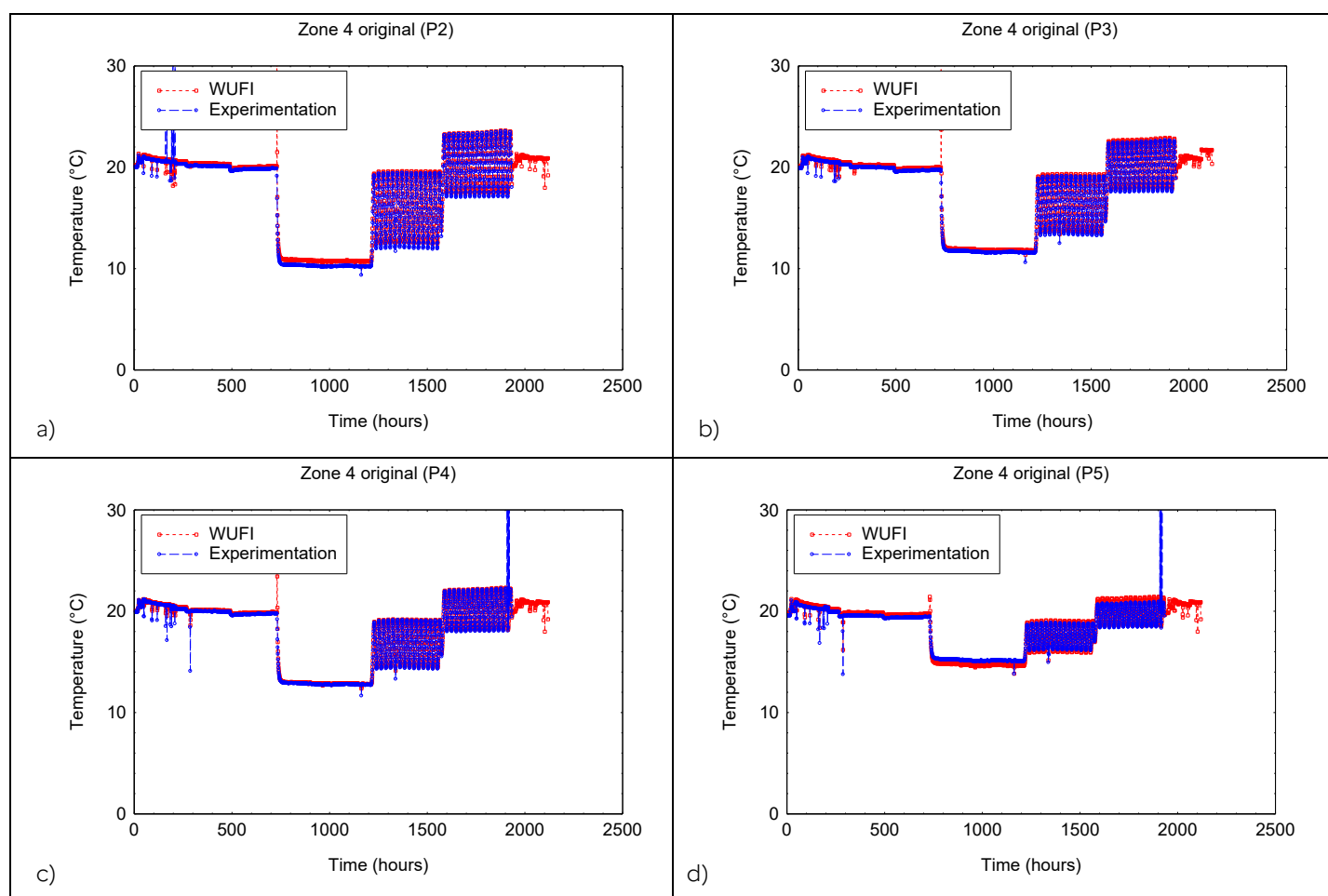


Figure 12 : Évolution de la température mur nu, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5

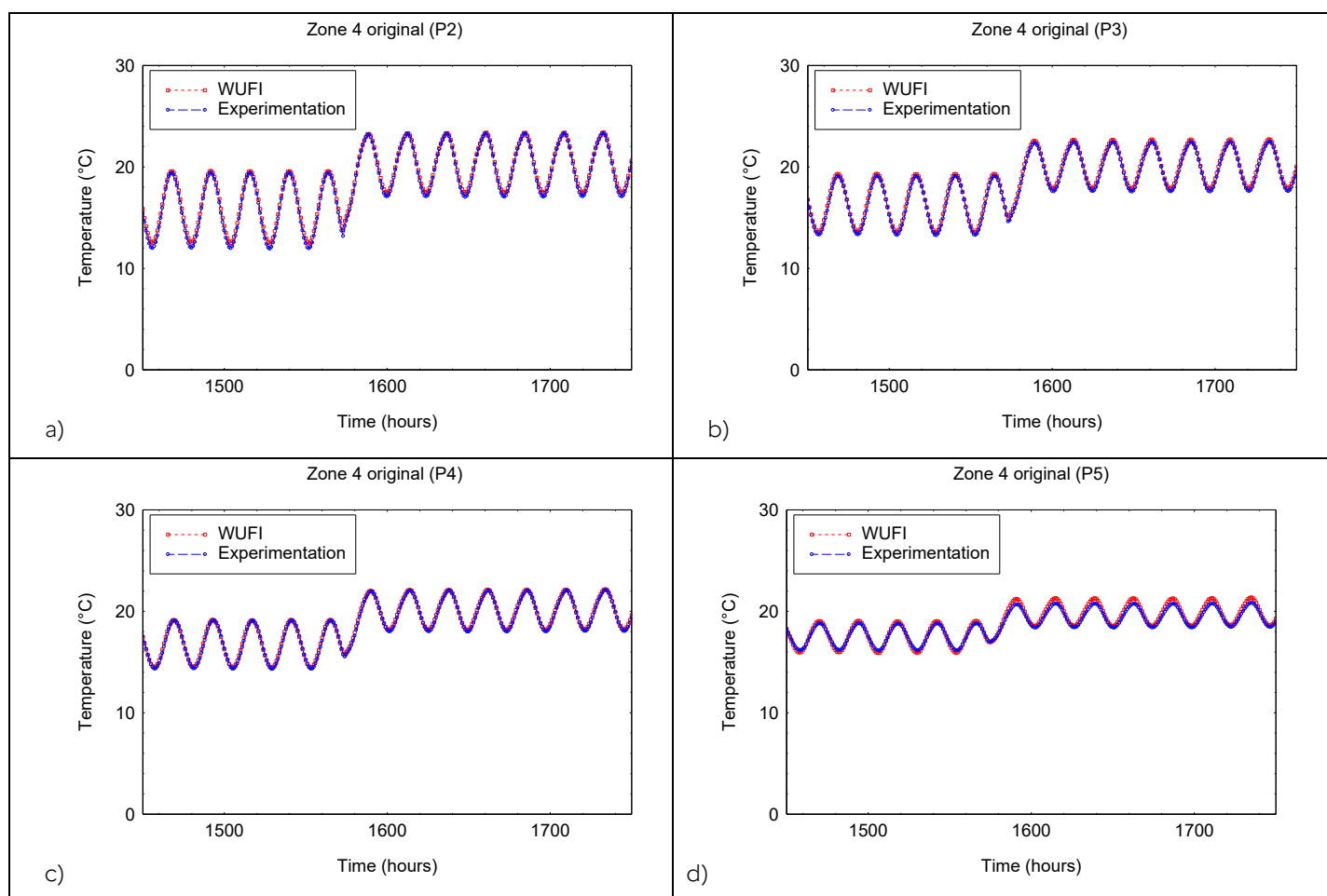


Figure 13 : Zoom sur l'évolution de la température mur nu, en régime dynamique, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5

L'Analyse de l'humidité relative mesurée au sein de la paroi :

La simulation de l'humidité relative au sein de la paroi (Figure 13, Figure 14) ne colle pas parfaitement aux mesures. Les tendances sont là, mais des écarts subsistent de 5 à 10 % d'humidité relative. Des problèmes de régulation et de mesure côté intérieur impactent les résultats proches de la surface intérieure (sonde P4 & P5), durant la période isotherme et hivernale. Les résultats sont moins impactés par ce problème côté extérieur.

En régime dynamique, pour le torchis classique comme allégé (Annexe B), les amplitudes sont différentes.

Plusieurs effets peuvent conduire à ces écarts :

- La précision des sondes SHT75 est de ± 2 % de HR.
- Le lattage en châtaigner peut introduire une résistance supplémentaire au flux de vapeur qui actuellement n'est pas pris en compte par le modèle.
- Le manchon de protection de la sonde SHT induit un déphasage d'environ de 20 à 50 minutes sur les variations d'humidité relative
- Les échantillons de torchis utilisés pour la mesure du coefficient de diffusion de vapeur ont été préparés dans des moules. Il est possible que la conformation des fibres soit différente dans le moule par rapport à celle dans le mur et modifie la valeur mesurée.

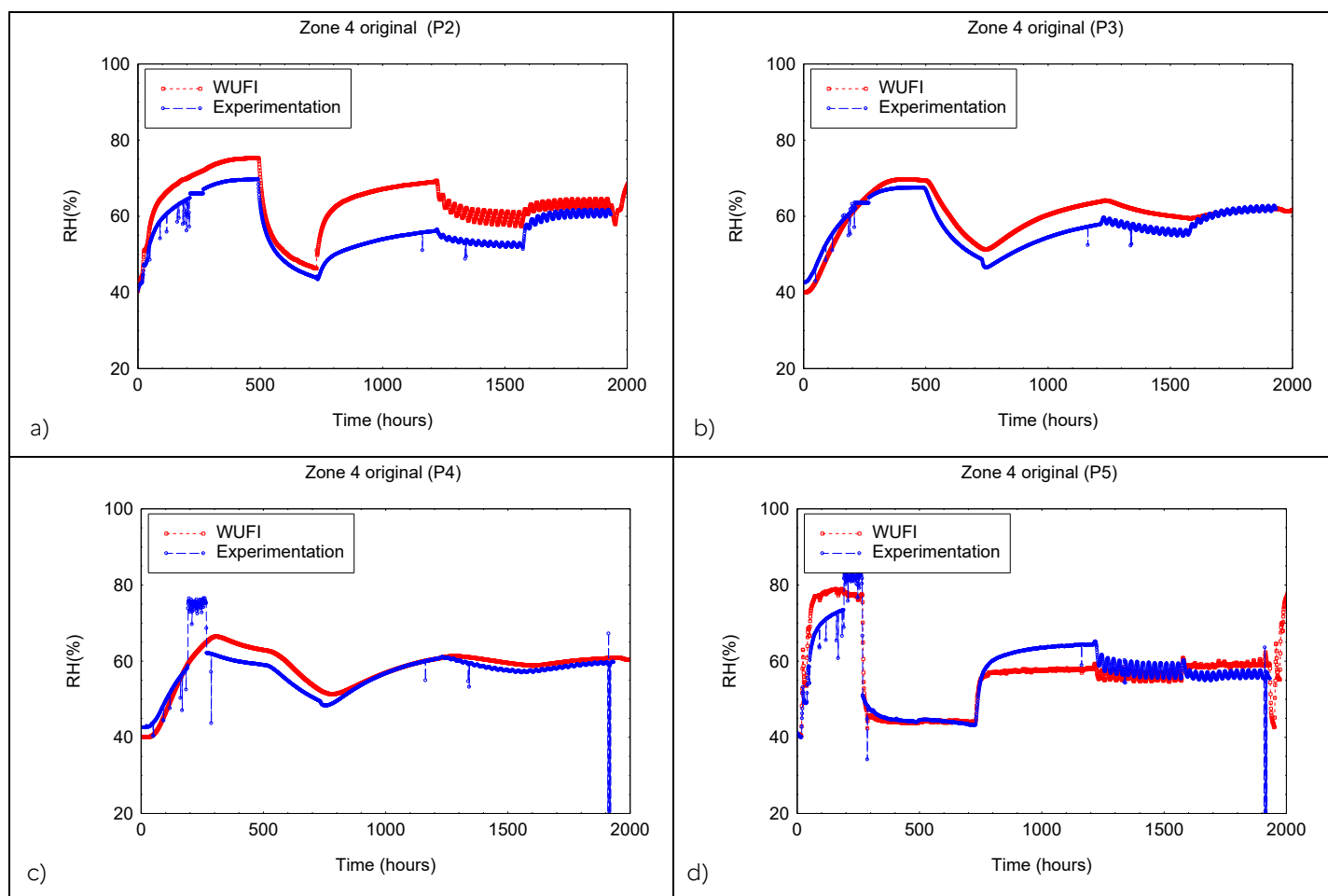


Figure 14 : Évolution de l'humidité relative, mur nu, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5

3.4.4.2. Analyse du comportement du mur isolé (torchis classique- Zone 4- terre-chanvre)

La partie suivante compare les mesures de certaines sondes de la Figure 15 ci-dessous à celles simulées avec WUFI après mise en place de l'isolation et au cours de la campagne reproduisant une phase isotherme avec choc hydrique, une phase hivernale, une phase d'intersaison et une estivale.

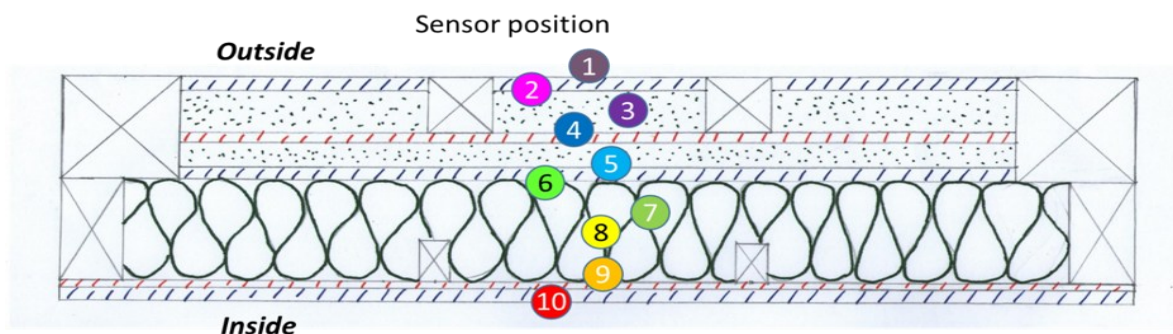


Figure 15 : Numérotation des sondes dans l'épaisseur de la paroi en correspondance aux courbes des figures ci-après. La position respective des sondes par rapport à la surface de l'enduit extérieur est pour P6, P7, P8, P9, P10, 150, 200, 270, 300, 329mm

Analyse de la température au sein du mur isolé en terre chanvre :

Les températures relevées et les températures calculées par la modélisation WUFI sont très proches (Figure 16, Figure 17). Les résultats illustrent le grand impact de l'isolation intérieure où les températures proches de la surface intérieure sont très stables avec une ITI.

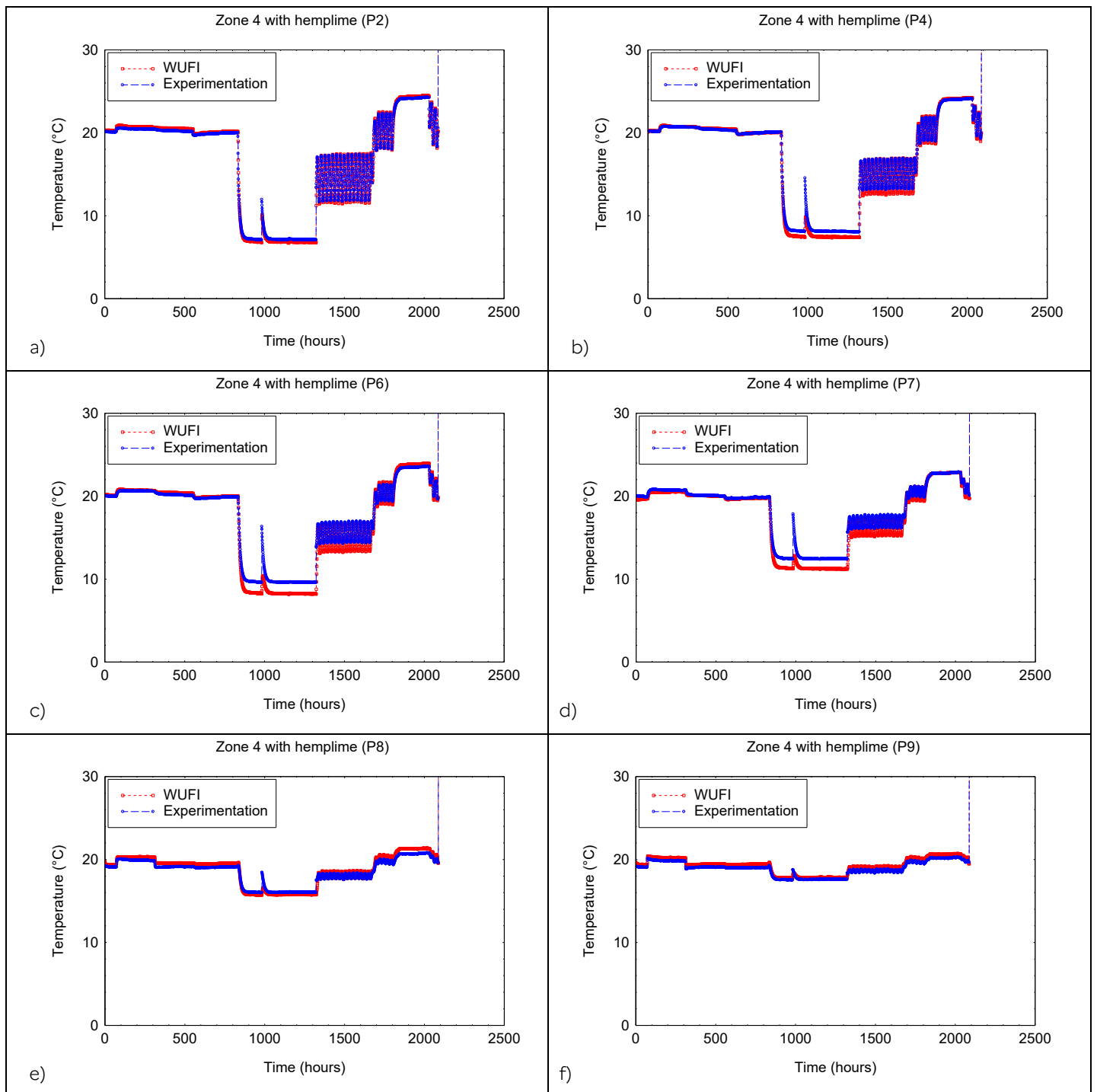


Figure 16 : Évolution de la température, mur isolé, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

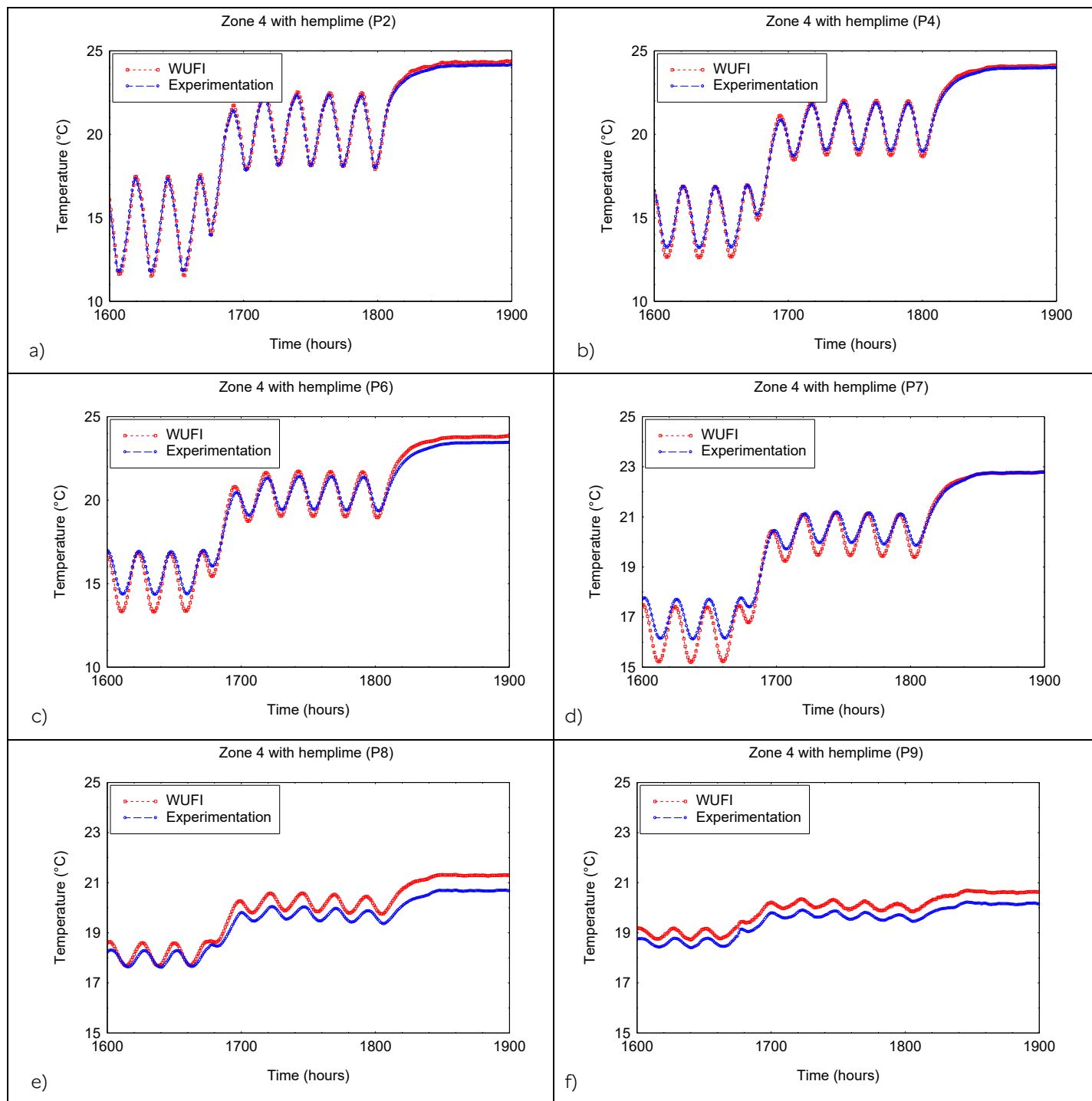


Figure 17 : : Zoom sur l'évolution de la température, mur isolé, en régime dynamique, zone 1, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

Analyse de l'évolution de l'HR au sein du mur isolé :

Sont observables sur la Figure 18 et la Figure 19 des différences selon les points de mesure, avec une courbe simulée plus ou moins proche selon la phase de l'essai. Il existe un écart allant jusqu'à 5 % d'humidité relative. La simulation WUFI a tendance à sous-estimer légèrement les humidités relatives observées. Les raisons de ces écarts peuvent être les mêmes que celles avancées précédemment pour le mur à pans de bois nu, sans ITI.

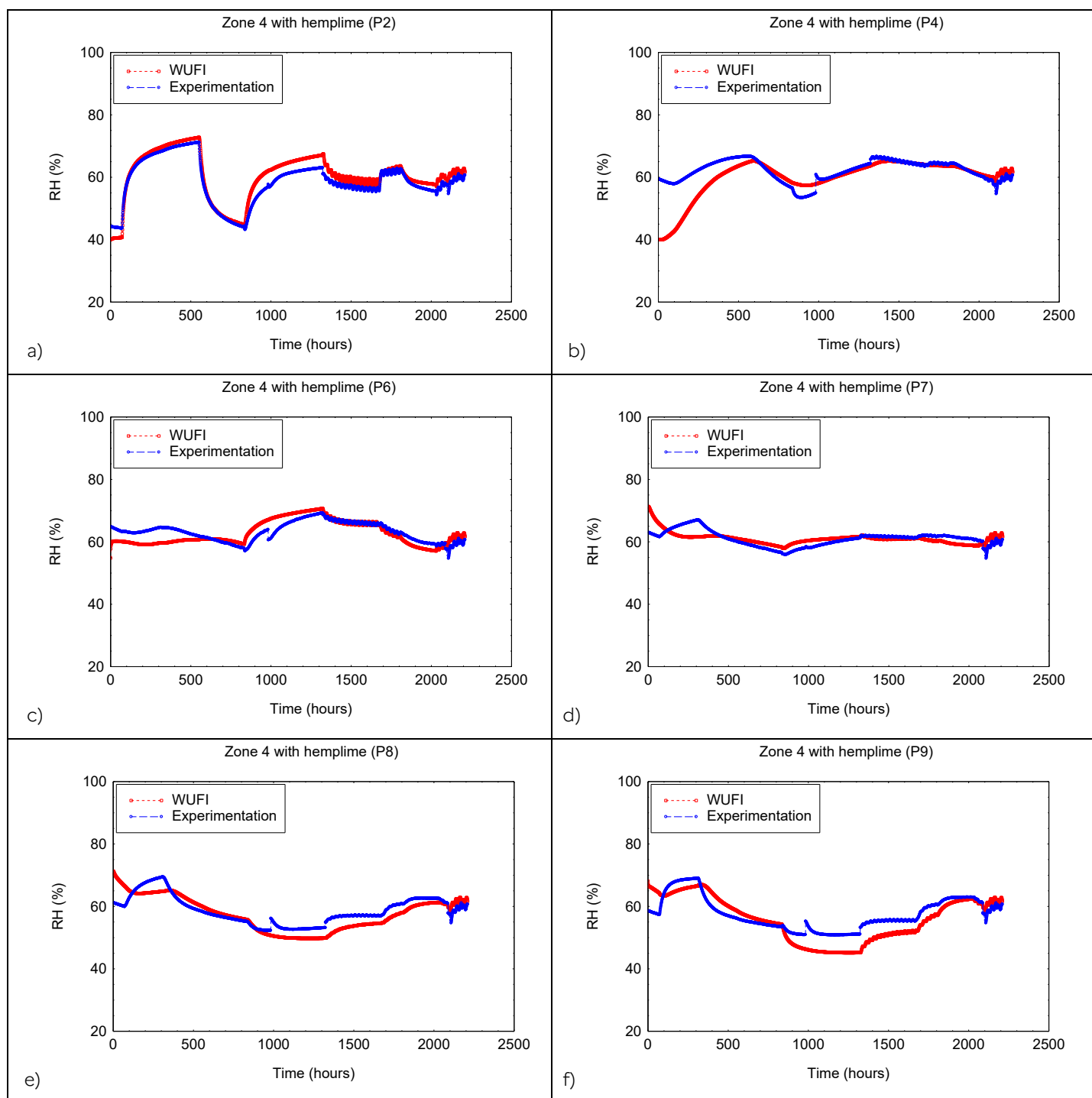


Figure 18 : Évolution de l'humidité relative, mur isolé, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

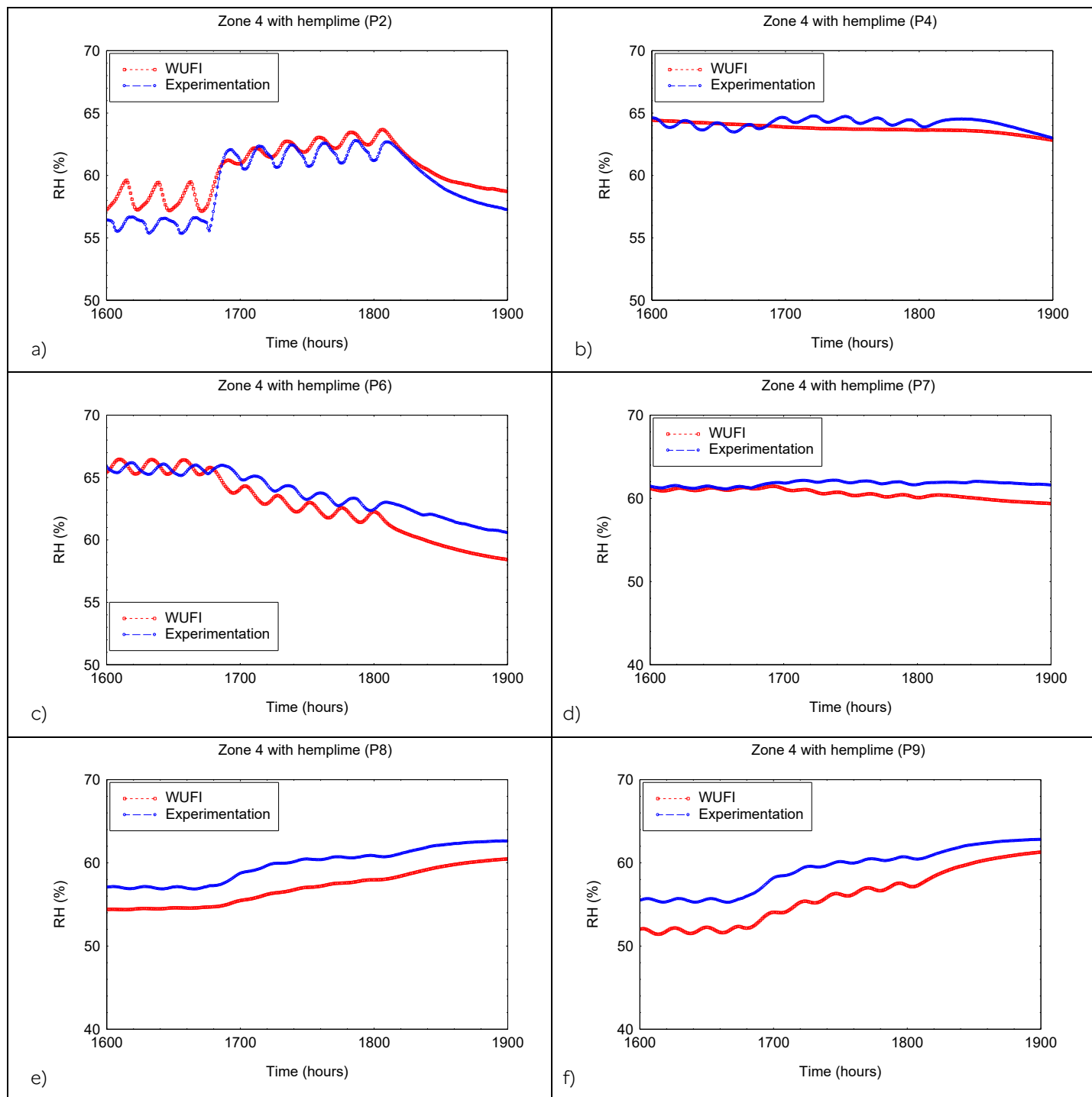


Figure 19 : Zoom sur l'évolution de l'humidité relative, mur isolé, en régime dynamique, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

3.5. Synthèse sur l'étude en laboratoire du mur à colombage

Dans ce livrable des essais ont été menés sur la double enceinte climatique du LERMAB avec le mur à pans de bois du projet BAUCH. Deux types d'ITI ont été ajoutés à ce mur, un isolant en fibres de jute et de chanvre (Combijute) et le terre-chanvre. Le premier isolant a nécessité l'ajout d'un frein vapeur. Une campagne de caractérisation du terre-chanvre a dû être menée pour pouvoir alimenter la modélisation en paramètres physiques. Des sondes SHT ont été ajoutées dans les nouvelles couches de l'ITI. Les conditions climatiques appliquées dans la double enceinte sont identiques à celles du projet BAUCH de manière à pouvoir comparer le comportement du mur nu et celui avec isolation thermique. Les données collectées sont riches et assez uniques au niveau de la littérature scientifique.

Des premières analyses et confrontations avec la modélisation numérique, avec le logiciel commercial, Wufi, ont été effectuées dans ce travail. Les résultats expérimentaux montrent que le terre-chanvre est très long à sécher. Dans les conditions appliquées 5 mois ont été nécessaires pour son séchage. La modélisation arrive à reproduire ce séchage à condition d'intégrer le lattage support. La modélisation permet de reproduire fidèlement la dynamique observée au niveau de la température au sein de la paroi avant et après isolation. Des écarts demeurent sur la dynamique de l'HR dans la paroi avec un écart qui n'excède cependant pas 5 à 10 % de HR. Différentes raisons ont été avancées qui peuvent expliquer ces écarts.

Une poursuite des confrontations est menée et présentée par le CERTES et présentée dans les sections suivantes du présent document.

3.5.1. Utilisation du modèle WUFI pour extrapoler à différentes configurations

La modélisation numérique WUFI étant relativement prédictive sur le cas d'étude, il est intéressant de tester et valider certaine configuration, soumise au climat réel.

Les hypothèses importantes sont les suivantes :

- Climat extérieur : Nancy
- Climat intérieur : Défini selon la norme WTA 6-2 (charge d'humidité moyenne)
- Étanchéité à l'air : $n_{50} = 3 \text{ vol/h}$
- Renouvellement d'air : 0.6 vol/h
- Simulation en paroi courante

Les simulations présentées ci-dessous ne sont qu'une partie des simulations réalisées. De nombreuses simulations ont été effectuées avec de multiples variantes (épaisseur d'isolant, orientation, étanchéité à l'air, coefficient d'absorption de l'enduit, coefficient de redistribution).

Les critères d'évaluation sont les critères du guide SimHuBat (2). Les 5 premiers millimètres d'isolants côtés extérieurs sont étudiés. La teneur d'eau en pourcentage de masse sèche ne doit pas excéder 23 % pendant une trop longue période.

Deux configurations sont testées :

- Orientation Nord, la plus froide, pour évaluer l'impact maximal d'isolant (Figure 20).
- Orientation Sud-Ouest, la plus humide (pluie battante), pour évaluer l'impact de l'absorption d'eau de pluie (Figure 21).

3.5.1.1. Épaisseur maximale d'isolant

La paroi simulée est identique à la paroi expérimentale de l'enceinte climatique (Figure 20). Seule l'épaisseur de l'isolation varie (15, 10 et 7 cm). Le coefficient d'absorption d'eau de pluie choisi est celui de l'enduit chaux de WUFI ($3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$). Cela correspond à la classe Wc 1.

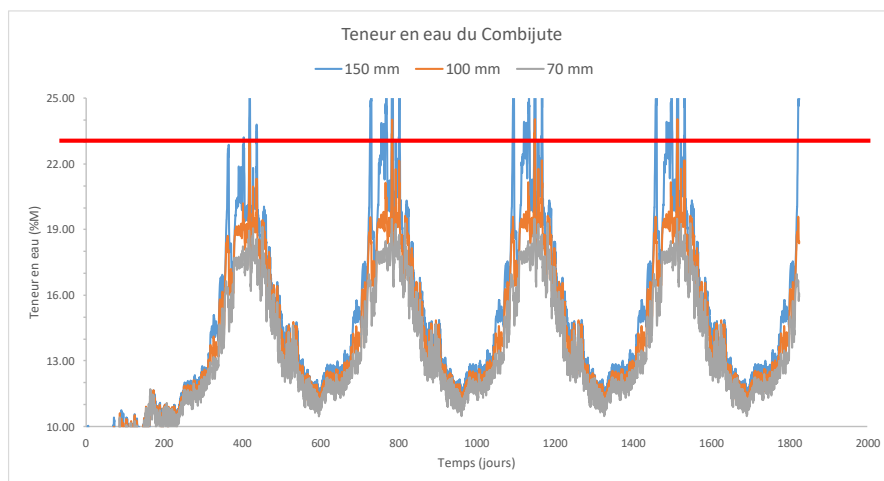


Figure 20 : Simulation avec WUFI pour l'évaluation de l'impact d'isolant d'une paroi avec orientation nord

Le trait rouge représente la limite des 23 % de teneur en eau.

Les simulations montrent bien l'impact de l'isolation sur la teneur en eau. Une isolation très performante, conduit à un refroidissement du mur, et donc une humidification.

Limiter l'épaisseur d'isolant en ITI est un paramètre important pour assurer la pérennité de la paroi.

3.5.1.2. Coefficient d'absorptivité de l'enduit extérieur

La paroi simulée est identique à la paroi expérimentale de l'enceinte climatique (Figure 21). Seul le coefficient d'absorption d'eau de pluie varie :

- Enduit A = 3 kg/m².h^{1/2}
- Enduit A = 1.5 kg/m².h^{1/2}
- Enduit A = 0.5 kg/m².h^{1/2}
- Recommandation du guide RAGE (3) : A = 0.2 kg/m².h^{1/2}

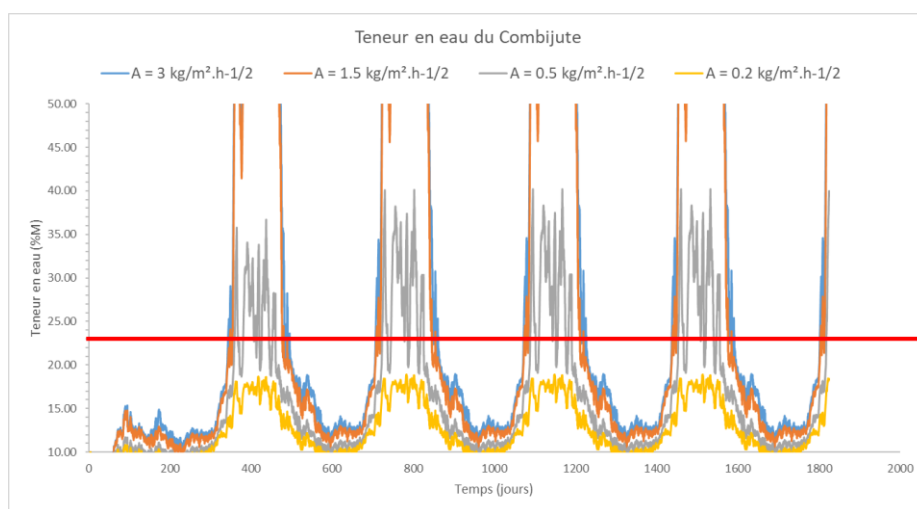


Figure 21 : Simulation avec WUFI pour évaluer l'impact de l'absorption d'eau de pluie dans le cas d'orientation Sud-Ouest (pluie battante)

Les simulations montrent le gros impact de l'apport d'eau de pluie sur la paroi. Une absorptivité de l'ordre de 0,2 kg/m².h^{-1/2} est nécessaire pour limiter la teneur en eau de l'isolant au niveau de la jonction torchis-isolant.

La base de données WUFI propose des enduits à la chaux avec des absorptivités de 3 à plus de 10 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, qui ne répondent pas aux attentes des présentes simulations. Différents enduits chaux adaptés pour le bâti ancien sont vendus dans le commerce. L'absorptivité à l'eau si elle n'est pas donnée dans la fiche technique du produit devra être demandée au fabricant. Il est à noter que les protections à l'eau de pluie (bâtiment voisin, débord de toiture) ne sont ici pas modélisées, i.e. zone découverte.

3.5.1.3. Conclusion intermédiaire

Les quelques simulations présentées ici permettent de tirer plusieurs conclusions pratiques :

- La pluie battante constitue un apport d'humidité dans la paroi qui peut être très conséquent. Les façades exposées sont « à risque ». Pour le réduire, quelques bonnes pratiques peuvent être adoptées :
 - Un débord de toiture généreux,
 - La mise en place de protections végétales,
 - Si la façade, exposée à la pluie battante, ne présente pas d'enjeux architecturaux, il peut être pertinent d'envisager un bardage ou toute autre forme de protection,
 - Caractériser l'absorptivité de l'enduit. Des méthodes économiques et faciles à utiliser sur site, comme la pipe de Kersten, existent pour donner un ordre de grandeur de A.

Dans le cas de réhabilitation bien conçu et soigné ($n_{50} < 3 \text{ vol/h}$ – renouvellement d'air $> 0.6 \text{ vol/h}$) l'apport d'humidité par les défauts d'étanchéité à l'air peut être limité. Il a été noté qu'une isolation très performante en ITI, conduit à un refroidissement du mur, qui peut amener l'humidité à rester haute à la jonction isolant-torchis. Une épaisseur jusqu'à 16 cm est possible mais nécessite une étude préalable.

3.6. Modèle numérique de transferts couplés de chaleur et d'humidité des murs à colombage avec isolation hygroscopique et géo/biosourcée

Le modèle utilisé par le CERTES dans ce projet a été élaboré dans le cadre des travaux de l'International Building Physics Toolbox (IBPT) de l'annexe 41 de l'agence International de l'Energie (AIE) [10] [11]. Ce code décrit les transferts de chaleur, air et humidité dans les enveloppes et l'air du bâtiment. La dénomination internationale est HAM Tools (Heat, Air and Moisture Tools). Le terme tools (outils) est relatif à la modularité du code.

Au cours du projet BAUCH [12] nous avons utilisé le code HAM-tools qui a été adapté par rapport à nos objectifs de recherche. Dans ce projet ISOLHYBBA nous utiliserons à nouveau ce code de calcul auquel nous apporterons les modifications et améliorations nécessaires.

L'intérêt de ce code de calcul est qu'il a été élaboré dans un cadre normalisé (projet AIE) et surtout qu'il est ouvert et libre. En d'autres termes, n'importe quel chercheur peut utiliser, développer ou modifier ce code. C'est la raison principale qui nous a amené à l'adopter. Ce code utilise l'environnement Simulink sous Matlab [13].

Le code est organisé par hiérarchie en systèmes et sous-systèmes sur plusieurs niveaux. Nous présenterons la structuration du code, les modèles mathématiques et numériques ainsi qu'un cas d'étude.

3.6.1. Structure du code de calcul

Le code est structuré en systèmes et sous-systèmes qui sont représentés par des « boîtes à outils » (tool boxes) développées et intégrées dans l'environnement Simulink (Figure 22). Elles sont nommées : « Constructions », « Weather », « Zones », « HVAC » et « Gains ».

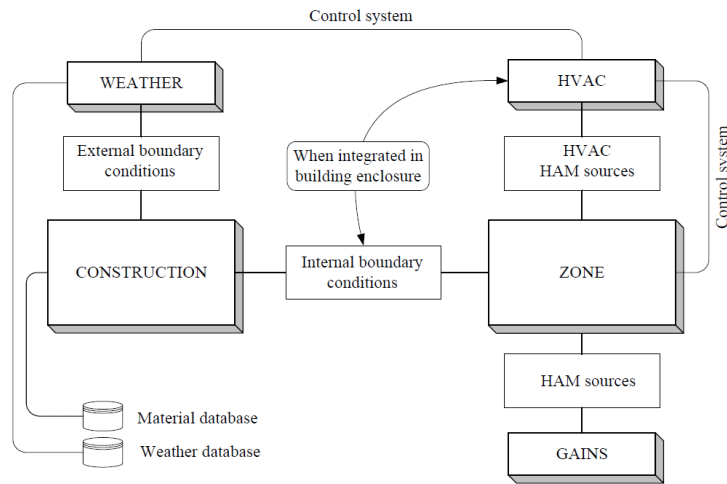


Figure 22 : Systèmes et sous-systèmes du HAM tool.

Le système « constructions » fait référence aux éléments de l'enveloppe du bâtiment comme les murs. « Weather » est relatif aux données climatiques et peut être alimenté par des fichiers de données annuelles normalisées ou mesurées. « Zones » contient les modèles de comportement de l'air dans un local, une pièce ou chambre, etc. « HVAC » concerne tout ce qui est chauffage, climatisation, ventilation ou traitement d'air. « Gains » représente les apports internes dus à l'occupation ou l'utilisation d'appareils (Figure 22).

Chaque système peut communiquer avec les autres systèmes grâce à des ports de Simulink. Des règles sont mises en place pour cela. En particulier, des tableaux de données sont introduits dès le départ pour une harmonisation des entrées sorties de chaque système. Par exemple, le Tableau 3 de l'outil « Construction » est le suivant :

Symbol	Description	Unit
R	Convective thermal surface resistance	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
T_{surf}	Surface temperature	$^{\circ}\text{C}$
R_p	Moisture surface resistance	$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg}$
$p_{v, surf}$	Surface vapour pressure	Pa
R_{air}	Air flow resistance	$\text{Pa} \cdot \text{s/m}^3$
P_{air}	Air pressure of inlet airflow	Pa
Q_{solar}	Transmitted solar energy	W/m^2
ε	Surface emissivity	-
T_{air}	Temperature of inlet airflow	$^{\circ}\text{C}$
ϕ_{air}	Relative humidity of inlet airflow	-
Snr	Surface number	-

Tableau 3 : Variables et données de l'outil « Construction ».

L'avantage d'utiliser Simulink est qu'il est doté de blocks prédéfinis, de fonctions mathématiques, numériques, composants linéaires et non linéaires très puissants sous forme d'objets à relier par des connecteurs. Les outils développés sous Simulink pour le HAM-tools code sont reportés en Figure 23.

Chaque outil est organisé d'une manière hiérarchique. Ce qui signifie que, si on appuie (click) sur un outil, on ouvre d'autres outils qui sont eux des sous-systèmes, qui à leur tour permettent l'accès encore à des outils de niveau inférieur. Nous détaillerons cet aspect dans les paragraphes suivants.

Comme indiqué ci-dessus les blocks développés dans HAM-Tools sont répartis en cinq catégories :

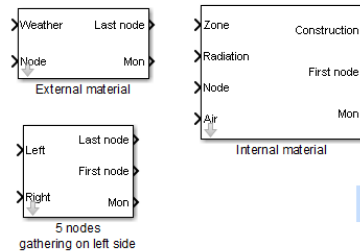
- Constructions : murs extérieurs et intérieurs.
- Zones : volume d'air dans une pièce ou lame d'air dans un mur.
- Systèmes : chauffage, climatisation et conditionnement d'air.
- Aides (Helpers) : données météorologiques et blocks basiques.
- Gains : apports internes.

Chaque block contient des sous-systèmes tels qu'indiqués en Figure 24 et Figure 25.

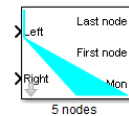


Figure 23 : Principaux blocs HAM-tools sous simulink Matlab

Blocks with pop-up menu



Blocks without pop-up menu



Walls

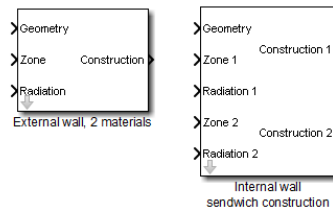


Figure 24 : Blocks constructions

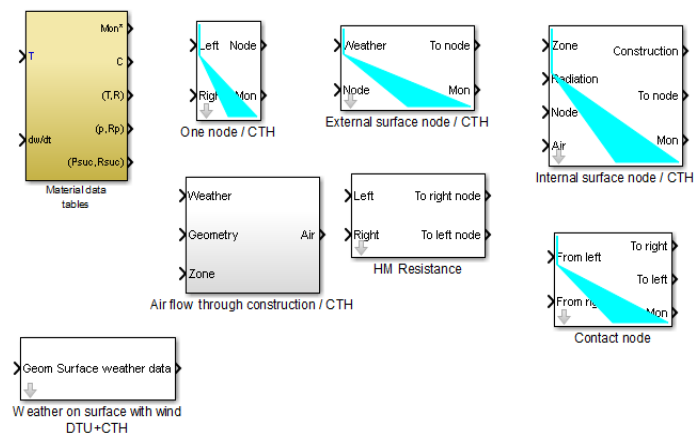


Figure 25 : Block Helpers

3.6.2. Modèle mathématique des transferts de chaleur, humidité et air

Le modèle est monodimensionnel ; il inclut les calculs des transferts couplés dans les murs intérieurs et extérieurs ainsi que l'air du bâtiment. En premier lieu il faut préciser les équations d'états utilisées.

La loi des gaz parfaits :

$$\frac{P_v}{v} = R_{H_2O} \cdot (T + 273.15) \quad (1)$$

L'humidité relative est définie par :

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad (2)$$

La pression capillaire (appelée aussi succion) est donnée par la relation de Kelvin :

$$s = -\rho_l \cdot R_{H_2O} \cdot (T + 273.15) \cdot \ln(\varphi) \quad (3)$$

La pression de vapeur de saturation est donnée par les formules de Hens [14] :

$$P_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042.9}{T+273.15-37.58}\right) \text{ pour } 0 \leq T \leq 80^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$P_{v,sat} = 611 \cdot \exp(82.9 \cdot 10^{-3} - 288.1 \cdot 10^{-6} T^2 + 4.403 \cdot 10^{-6} T^3) \text{ pour } -30 \leq T \leq 0^\circ\text{C} \quad (5)$$

La perméabilité de la vapeur à l'air stagnant [15] :

$$\delta_0 = \frac{26.1 \cdot 10^{-6}}{R_{H_2O}(T+273.15)} \quad (6)$$

3.6.3. Modèle monodimensionnel de transport de chaleur, humidité et air dans les enveloppes de bâtiment

Les équations du modèle monodimensionnel sont incorporées dans le bloc « Construction ». Les hypothèses suivantes sont prises en compte [16] :

- Température comprise entre -30 et +80°C.
- Les effets de changement de phase en glace sont négligés.
- La prise en compte de la pluie sur les faces externes des murs est simplifiée.
- L'hystérésis n'est pas prise en compte.
- Pas d'effet de gravité.
- L'influence de l'âge des matériaux n'est pas considérée.

3.6.3.1. Équations principales

Le flux d'air g_{air} à travers la structure est dû aux différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur :

$$g_{air} = \rho_{air} \cdot q_{air} \quad (7)$$

Le flux de chaleur est composé d'une part conductive et d'une part convective. Le flux conductif est :

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

Le flux convectif est :

$$q_{conv} = g_{air} \cdot C_{p,air} \cdot T + g_v \cdot h_e \quad (9)$$

Le flux d'humidité est composé de la diffusion de la vapeur et de transport de liquide :

$$g = g_v + g_l \quad (10)$$

$$g_v = -\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} + g_{air} \cdot x_{air} \quad (11)$$

$$g_l = \lambda_{m,l} \frac{\partial s}{\partial x} \quad (12)$$

$$x_{air} = 6.21 \cdot 10^{-6} p_v \quad (13)$$

Les équations de chaleur et d'humidité sont données par :

$$-\frac{\partial q}{\partial x} = C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

$$-\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (15)$$

3.6.3.2. Propriétés thermo hydriques des matériaux

La capacité thermique spécifique est définie par :

$$C_p = C_{p,s} + \frac{1}{\rho_s} C_{p,l} w_l \quad (16)$$

La conductivité thermique est donnée par :

$$\lambda = \lambda_{s,ref} + \lambda_T(T - T_{ref}) + \lambda_w(w - w_{ref}) \quad (17)$$

L'humidité accumulée dans un matériau dépend de l'humidité relative ambiante. Cette capacité de stockage est décrite par la courbe de sorption (taux massique d'humidité en fonction de l'humidité relative $w(\varphi)$) ou de rétention ($\varphi(w)$). La forme générale de cette courbe est indiquée en Figure 26.

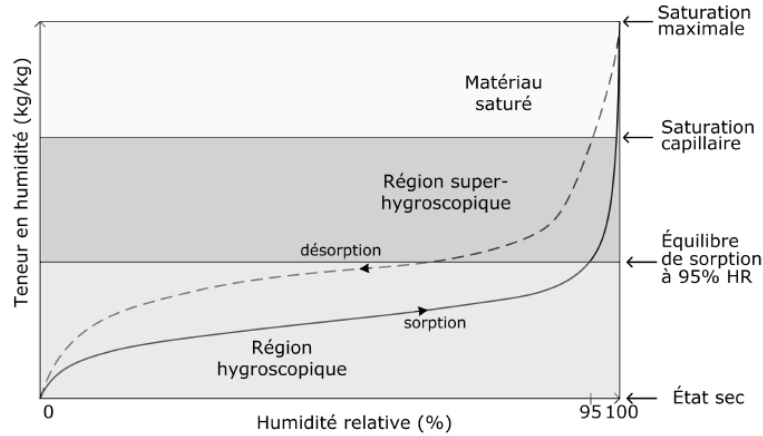


Figure 26 : Forme générale d'une courbe de sorption

Les différents états d'équilibre sont décrits dans la courbe de sorption [17]. Le comportement diffère entre les processus de sorption ou désorption. L'hystérésis est toutefois souvent négligée ; la courbe de sorption ou une courbe entre les deux est utilisée.

Les coefficients de transferts hydriques sont introduits à partir de base de données de mesures. Il s'agit principalement de la perméabilité de la vapeur d'eau δ_p et de la conductivité liquide $\lambda_{m,l}$. On utilisera les données mesurées au CERTES et au LERMAB sur les matériaux utilisés dans ce projet. Il faut noter que d'autres bases de données existent dans le code HAM-tools ainsi que des travaux les plus connus [18] [19] mais ils ne comportent pas des matériaux géo ou biosourcés et hygroscopiques.

3.6.4. Modèle numérique de transfert dans les murs

Le système d'équations des transferts couplés est le suivant [17] [20] :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_e \frac{\partial g_v}{\partial x} + C_{p,air} g_{air} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (18)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\left(\frac{\partial g_v}{\partial x} + \frac{\partial g_l}{\partial x}\right) \quad (19)$$

La méthode numérique utilisée est basée sur un volume de contrôle et une discrétisation temporelle explicite. La résolution numérique pour un nœud en partie courante est donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} &= \frac{1}{C_p^n \rho_s d} \left[\left(\frac{T_{i-1} - T_i}{R_{i-1} + R_i} + \frac{T_{i+1} - T_i}{R_{i+1} + R_i} \right) - h_e \left(\frac{p_{v,i-1} - p_{v,i}}{R_{p,i-1} + R_{p,i}} + \frac{p_{v,i+1} - p_{v,i}}{R_{p,i+1} + R_{p,i}} \right) \right]^n \\ &\quad + \begin{cases} g_{air} C_{p,air} (T_{i-1} - T_i)^n, & g_{air} > 0 \\ g_{air} C_{p,air} (T_i - T_{i+1})^n, & g_{air} < 0 \end{cases} \\ \frac{w_i^{n+1} - w_i^n}{\Delta t} &= \frac{1}{d} \left[\left(\frac{p_{v,i-1} - p_{v,i}}{R_{p,i-1} + R_{p,i}} + \frac{p_{v,i+1} - p_{v,i}}{R_{p,i+1} + R_{p,i}} \right) - \left(\frac{s_{i-1} - s_i}{R_{s,i-1} + R_{s,i}} + \frac{s_{i+1} - s_i}{R_{s,i+1} + R_{s,i}} \right) \right]^n \\ &\quad + \begin{cases} 6.21 g_{air} (p_{v,i-1} - p_{v,i})^n, & g_{air} > 0 \\ 6.21 g_{air} (p_{v,i} - p_{v,i+1})^n, & g_{air} < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

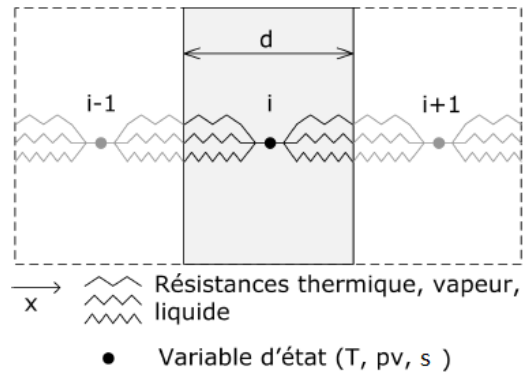


Figure 27 : Schéma d'un du maillage en partie courante

Avec : $R = \frac{d/2}{\lambda}$, $R_p = \frac{d/2}{\delta_p}$, $R_s = \frac{d/2}{\lambda_{m,l}}$

Pour les autres nœuds tels que : surface extérieure ou intérieure, contact de deux matériaux, etc. (Figure 28) ; une description complète se trouve dans [10].

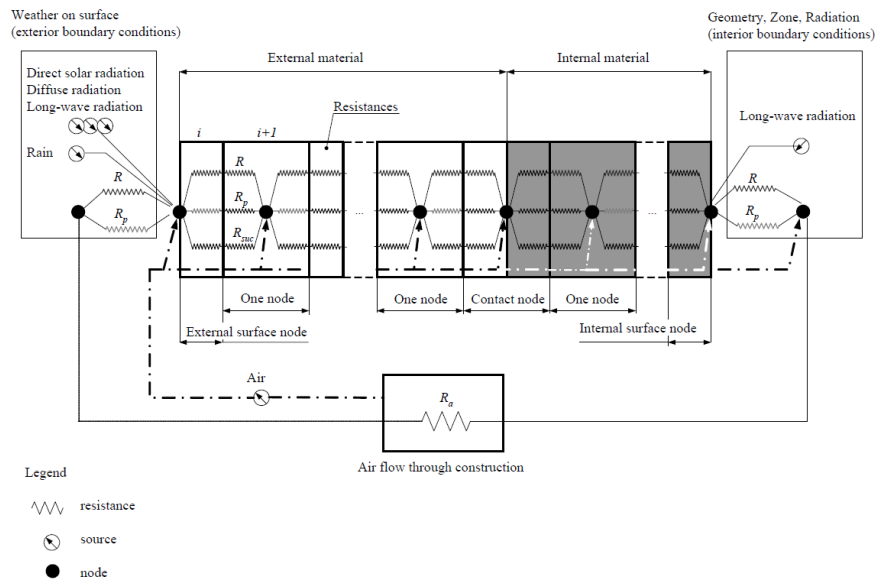


Figure 28 : Maillage d'un mur dans HAM-Tools

3.7. Étude de cas de la paroi du projet BAUCH

Nous avons choisi de prendre comme premier cas à étudier, le mur utilisé au LERMAB dans le cadre du projet BAUCH [12] dans lequel nous avons inclus dans le schéma numérique une isolation hygroscopique et géo ou biosourcée en fibres de bois et un frein vapeur (Figure 29, Figure 30, Figure 31).

Un modèle dénommé WAVO [21] permet de déterminer l'évolution des températures et humidités de l'air intérieur. Cependant, dans cette étude nous considérons des conditions mesurées en temps réel soit par la double enceinte climatique du LERMAB ou des mesures in situ à Puiseux en Bray (Oise). Les données d'entrée météorologiques simulées et les caractéristiques thermo-hydrauliques relevées au LERMAB et à Puiseux en Bray seront utilisées. Les caractéristiques des matériaux sont issues des rapports du projet BAUCH et des travaux du LERMAB sur la fibre de bois [22].

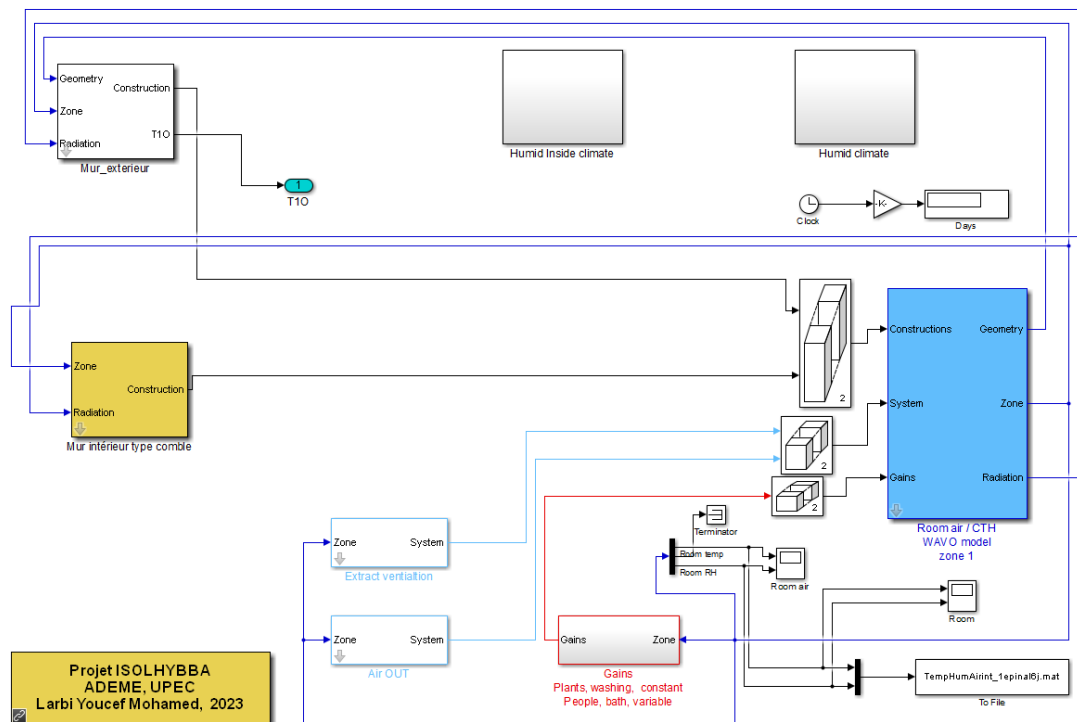


Figure 29 : Cas d'étude sous Simulink Matlab

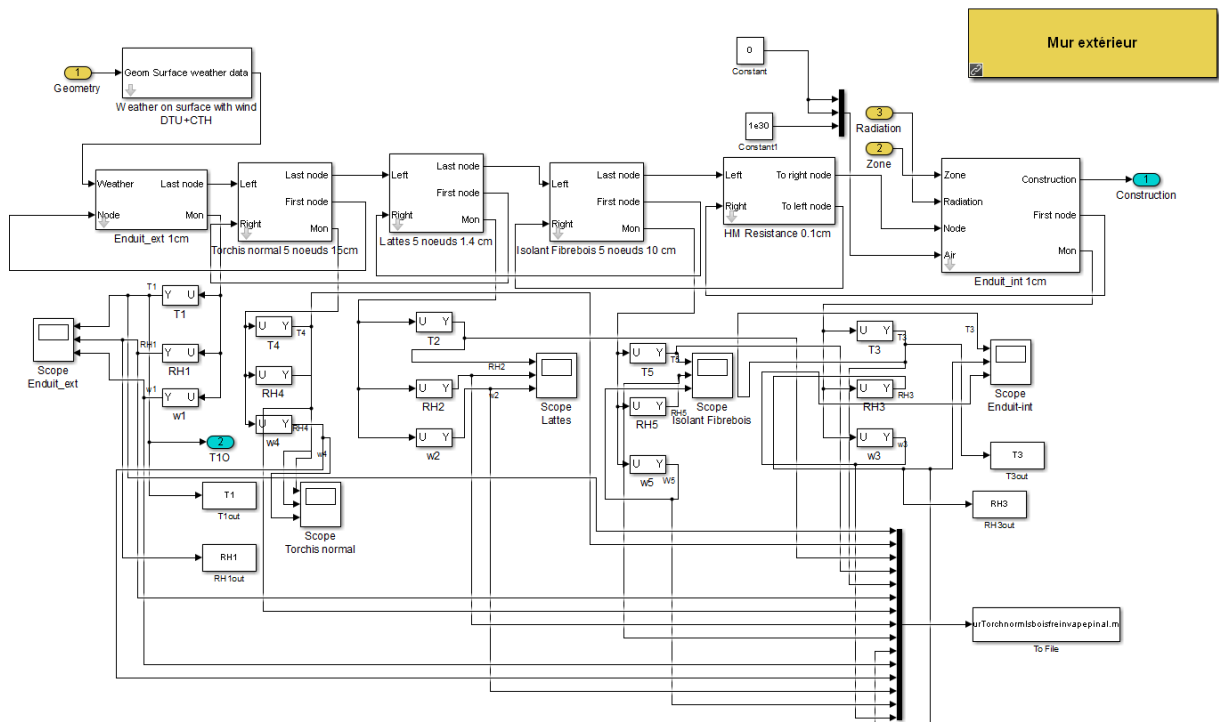


Figure 30 : Schéma HAM tools mur à colombage avec isolation en fibres de bois et frein vapeur

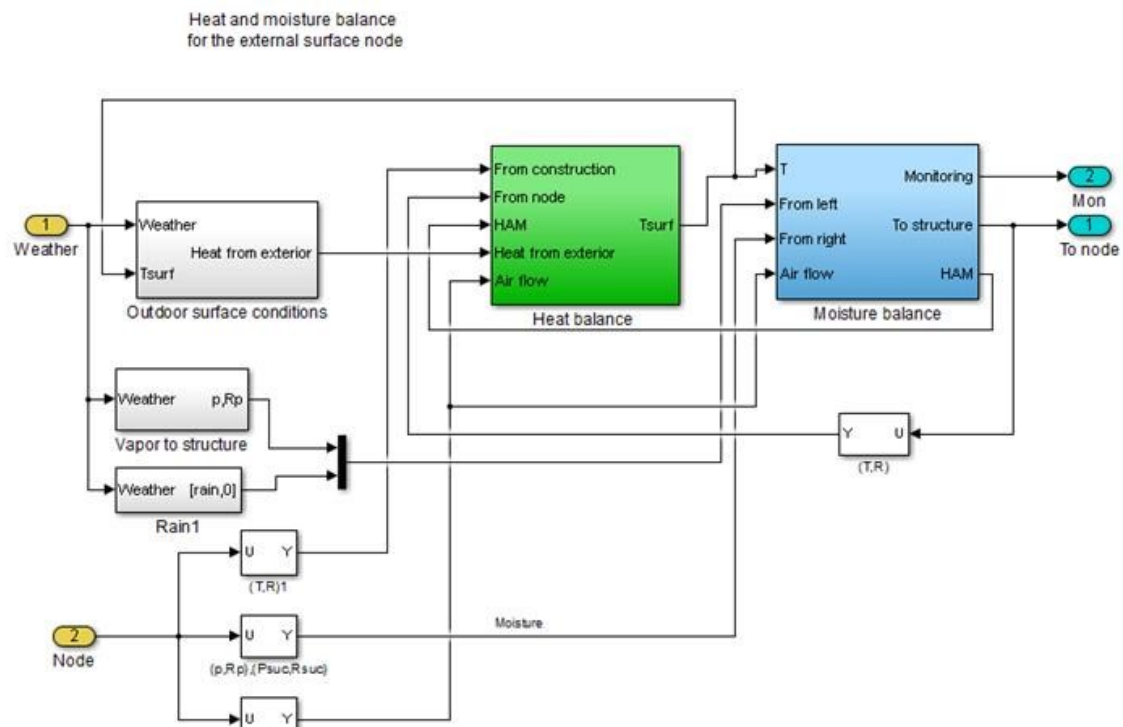


Figure 31 : Modélisation des transferts thermiques et hydriques dans HAM-tools

3.7.1. Résultats cas de la paroi du projet BAUCH

Nous présentons les évolutions de températures et taux d'humidité sur les deux volumes de l'enceinte bi climatique qui simulent respectivement un climat extérieur et des conditions intérieures (Figure 32, Figure 33).

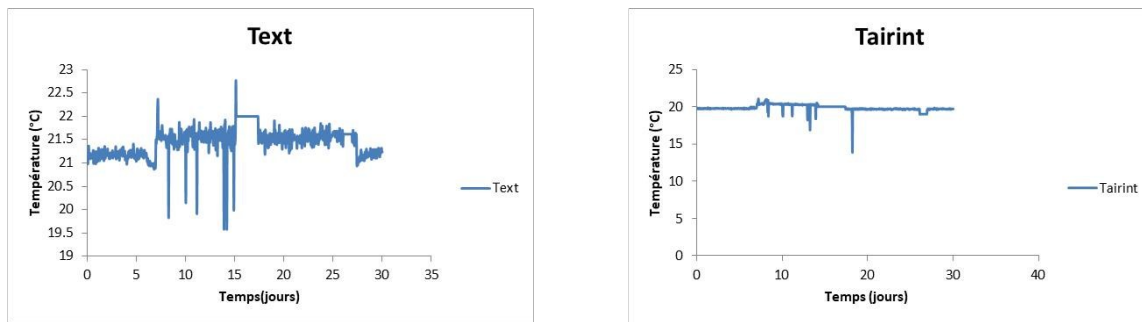


Figure 32 : Températures extérieures (Text) et intérieures (Tairint) enceinte biclimatique LERMAB

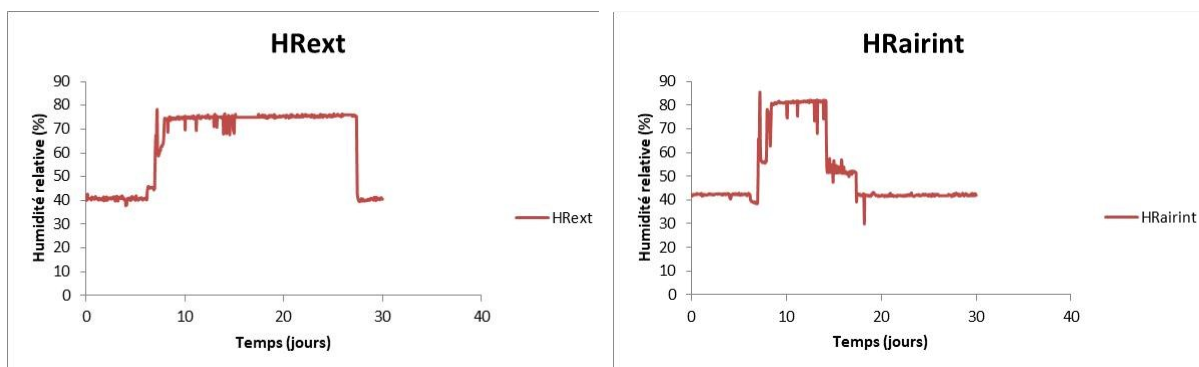


Figure 33 : Humidités extérieures (HRExt) et intérieures (Hairint) enceinte biclimatique LERMAB

Nous avons introduit un frein vapeur de valeur S_d égale à 2 et présenté les résultats lorsque ce frein vapeur est en place ou non ($S_d=0$) (Figure 35 à Figure 37).

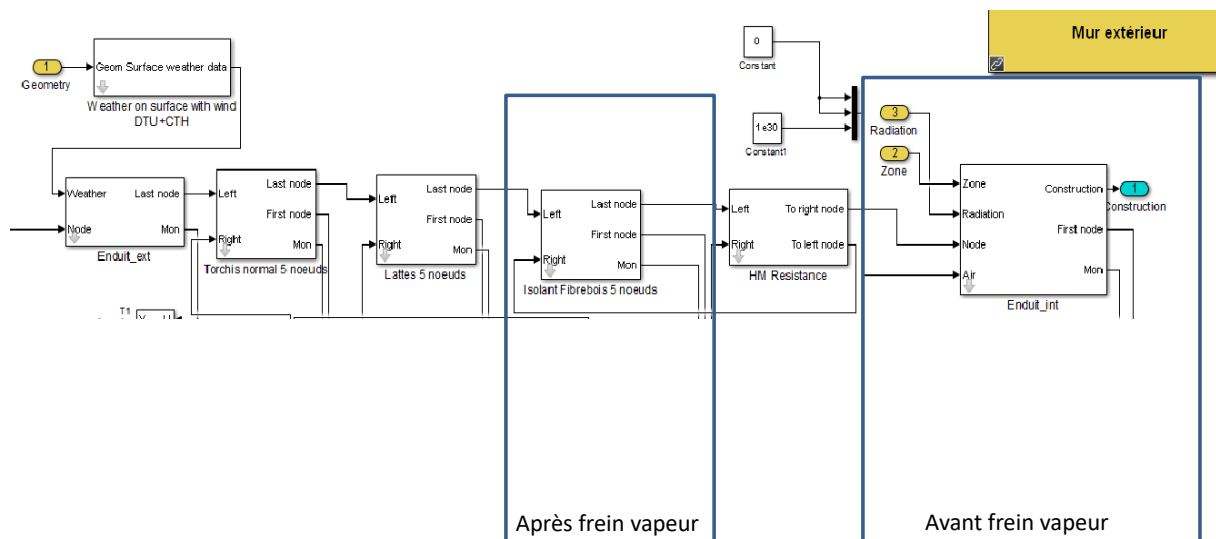


Figure 34 : Étude de l'effet de la pose d'un frein vapeur

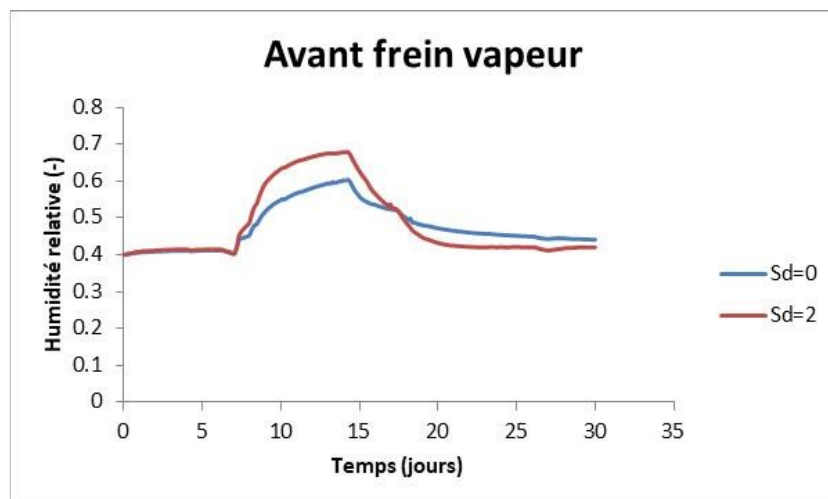


Figure 35 : Évolution humidité relative couche avant frein vapeur (enduit intérieur)

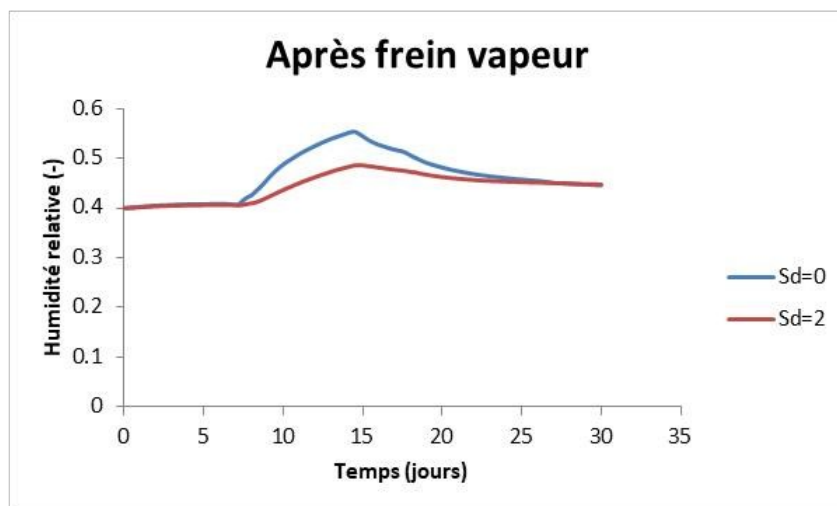


Figure 36 : Évolution humidité relative couche après frein vapeur (isolant fibre bois)

Nous observons l'effet de la présence du frein vapeur par une augmentation du taux d'humidité dans la partie avant et une diminution dans la partie après (Figure 35 et Figure 36). Il en est de même dans la couche d'isolant en fibre de bois (Figure 37).

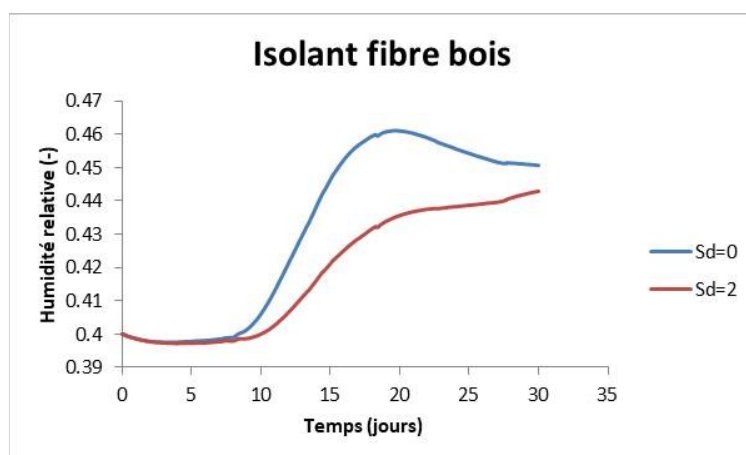


Figure 37 : Évolution humidité relative milieu isolant fibre bois

Pour finir, dans cette partie du travail nous avons présenté les développements effectués sur un modèle HAM-tools pour l'adapter aux travaux du projet ISOLHYBBA en partant des résultats du projet BAUCH. Ce modèle réalisé dans le cadre de l'annexe 41 de l'AIE est a été validé et mis à la disposition de la communauté scientifique. C'est un code libre et ouvert, chacun peut y apporter des améliorations.

A partir d'un cas d'étude, nous avons mené des simulations en adaptant le code aux besoins du projet ISOLHYBBA. En particulier, nous avons simplifié la simulation des conditions intérieures et introduit les conditions météorologiques mesurées et ajouté des matériaux géo et/ou biosourcés et hygroscopiques dans la base de données du code. Des améliorations seront apportées au fur et mesure des travaux et surtout des essais expérimentaux in situ et en laboratoire pour affiner le modèle.

3.7.2. Étude de cas du nouveau mur construit au LERMAB

3.7.2.1. Isolation avec Comijute

Le laboratoire LERMAB d'Épinal a mené des expérimentations sur un mur à colombage avec une partie comportant une isolation en terre chanvre et une autre partie combijute (Figure 38). Pour cela, une double enceinte climatique a été utilisée pour simuler un climat extérieur sur une face et un climat intérieur sur l'autre face du mur.

Des sondes sensorielles qui mesurent la température et l'humidité relative ont été introduites à différentes profondeurs du mur. Les sondes sont indiquées par des cercles en couleur. Nous avons exploité une partie des mesures que le LERMAB nous a fournies pour effectuer des confrontations avec le modèle HAM-tools.

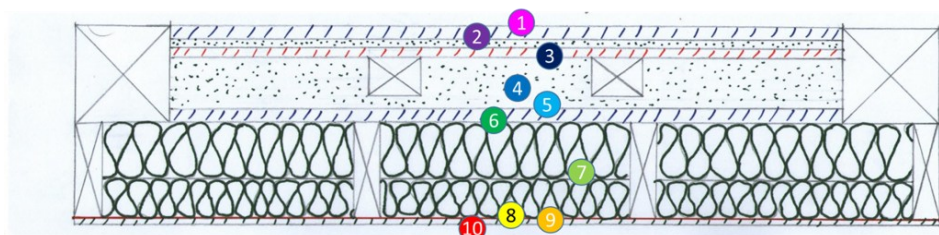


Figure 38 : Position des sondes dans les couches ajoutées (ITI en fibres de jute et de chanvre - Combijute)

Les résultats des confrontations des données numériques du code HAM-tools et des mesures en laboratoire au LERMAB sont exposés dans Figure 39 à Figure 44. Comme pour les confrontations avec les mesures du site de Puiseux en Bray, nous constatons qu'il y a un bon accord entre les températures calculées et mesurées. Pour les humidités relatives, des écarts apparaissent mais ne dépassent pas 10 %.

Nous observons que lors d'un échelon (Figure 44), la montée et la descente en humidité relative peut subir un retard. Ce problème est entièrement numérique. Au contraire, dans la Figure 42 on observe un bon comportement du modèle numérique.

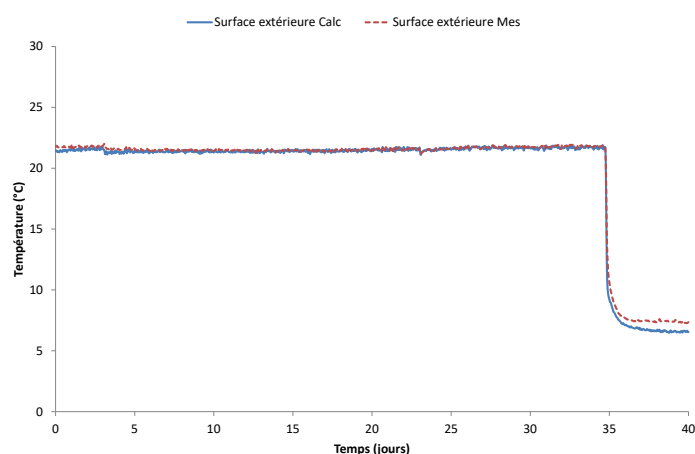


Figure 39 : Températures mesurées et calculées surface extérieure du mur avec isolation en combijute

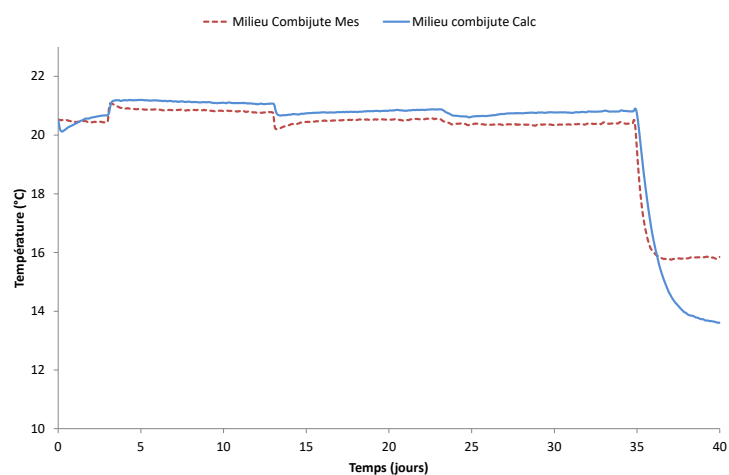


Figure 40 : Températures milieu combijute calculées et mesurées.

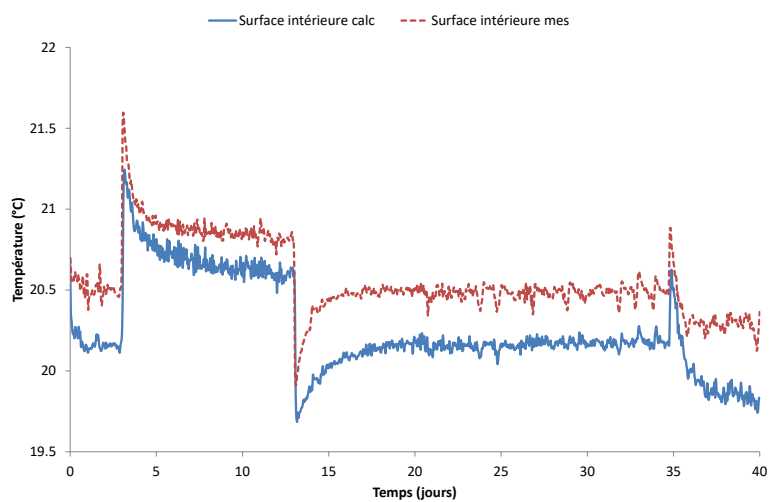


Figure 41 : Températures surface intérieure calculées et mesurées

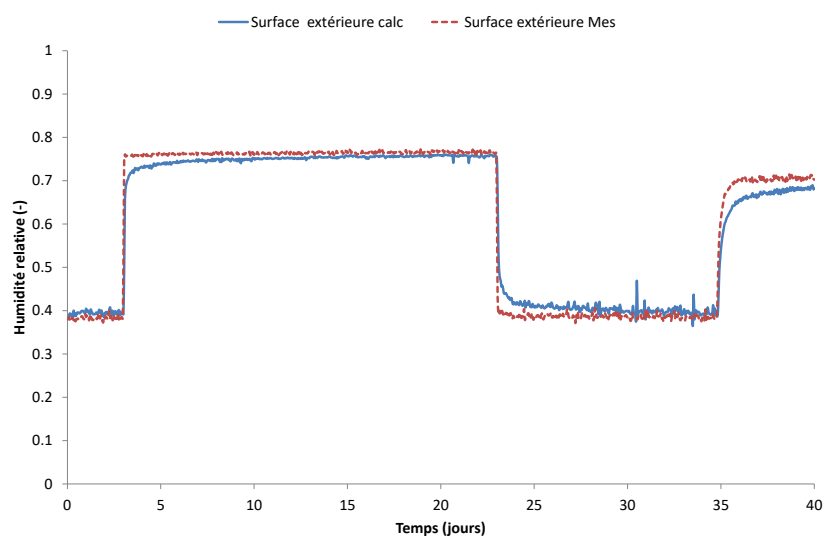


Figure 42 : Humidités relatives calculées et mesurées pour la surface extérieure

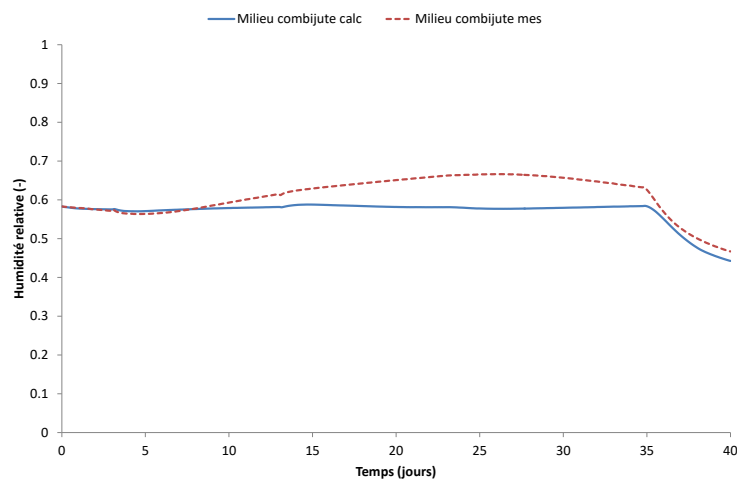


Figure 43 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du combijute

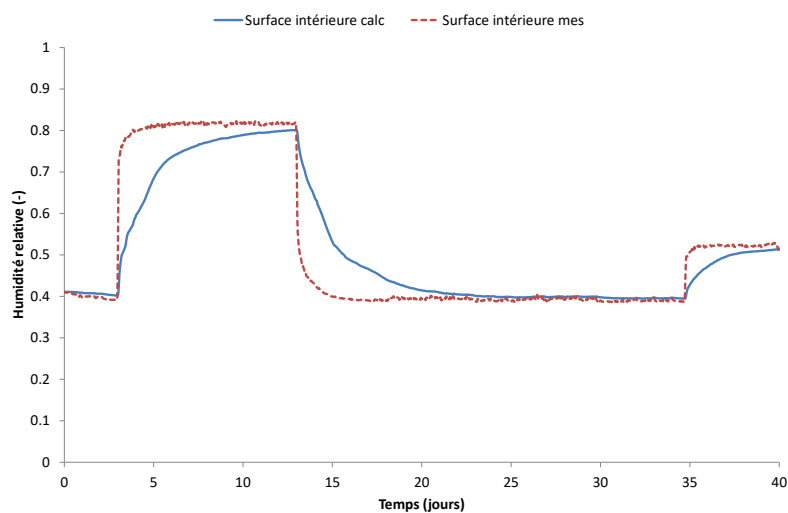


Figure 44 : Humidités relatives calculées et mesurées à la surface intérieure du mur avec combijute

3.7.2.1. Isolation en terre chanvre

Le mur à colombage avec une partie comportant une isolation en terre chanvre a aussi été installée dans une double enceinte climatique pour simuler un climat extérieur sur une face et un climat intérieur sur l'autre face du mur. Dans ce cas aussi plusieurs sondes sensorielles (indiquées par des cercles en couleur) ont été utilisées pour mesurer les variations de la température et l'humidité relative à différentes profondeurs du mur (Figure 45).

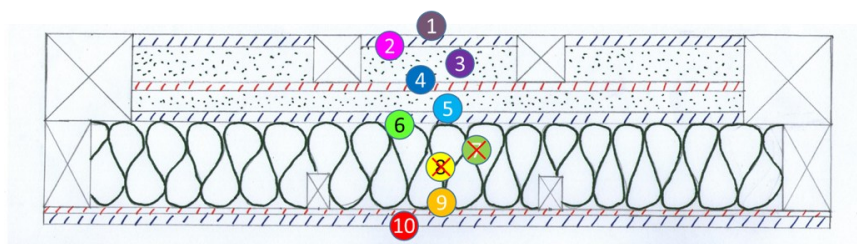


Figure 45 : Position des sondes dans les couches ajoutées (ITI en terre chanvre)

Les mesures de température et d'humidité ont été comparées aux simulations numériques pour différentes profondeurs et sont présentées dans les figures suivantes.

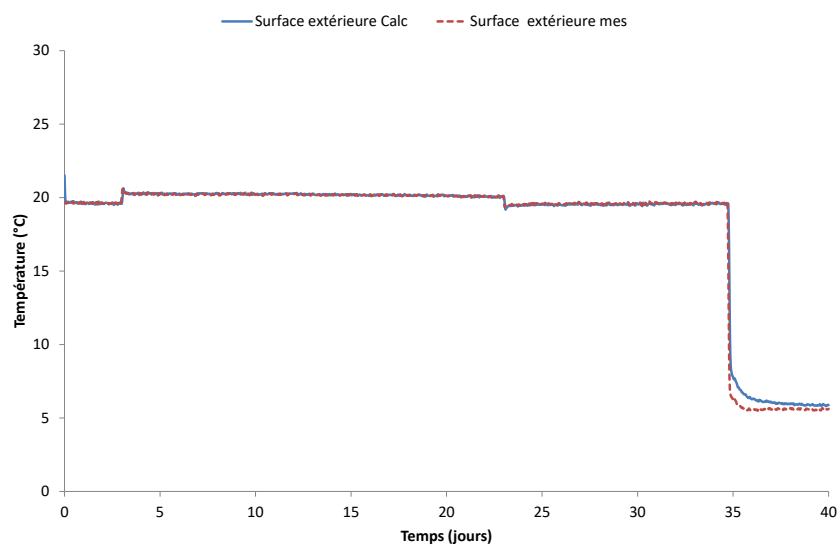


Figure 46 : Températures mesurées et calculées mur avec terre chanvre

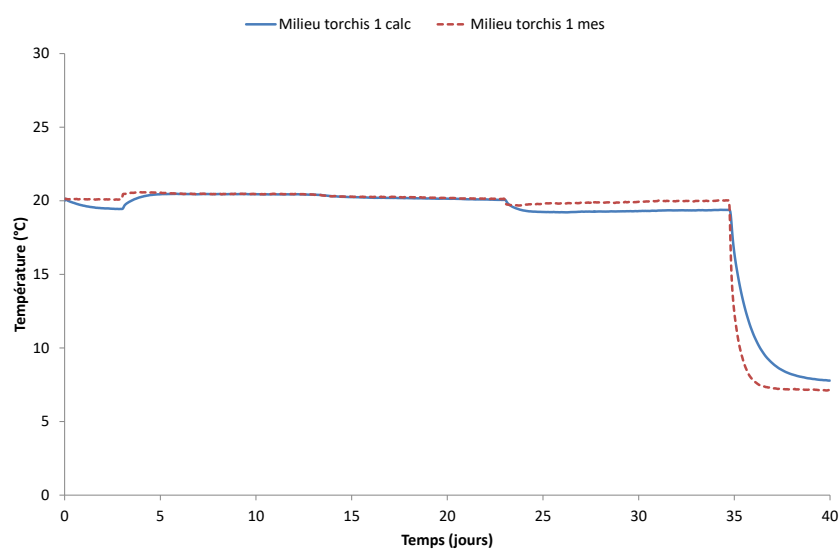


Figure 47 : Températures calculées et mesurées au milieu du torchis

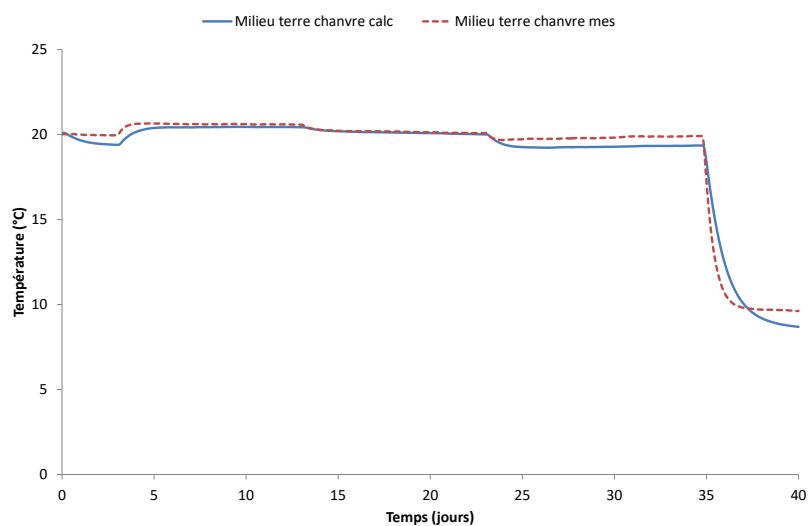


Figure 48 : températures mesurées et calculées au milieu du terre chanvre

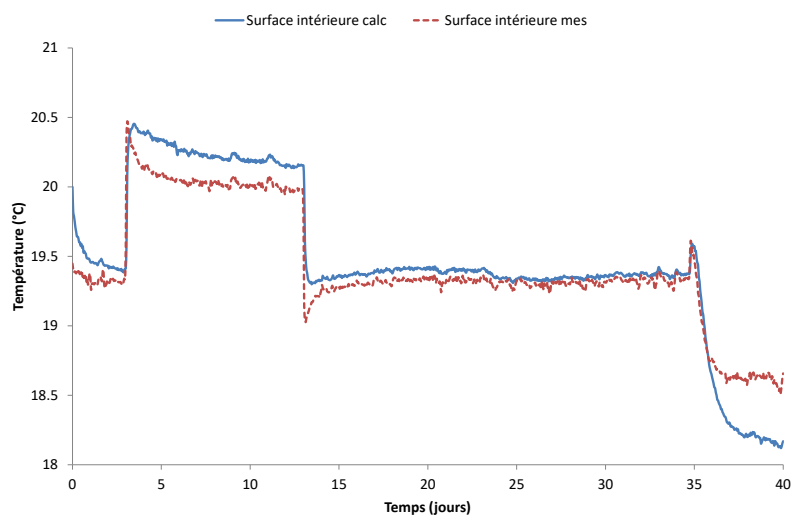


Figure 49 : Températures calculées et mesurées à la surface intérieure du mur avec terre chanvre

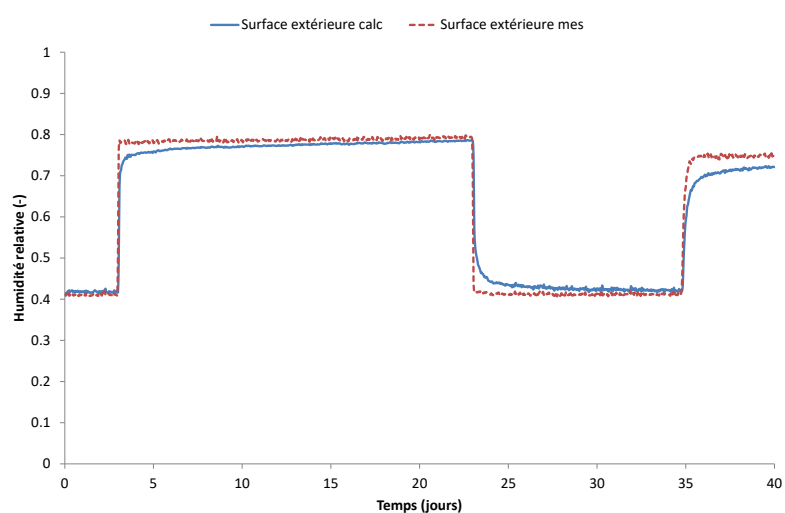


Figure 50 : Humidités relatives calculées et mesurées surface extérieure du mur avec terre chanvre

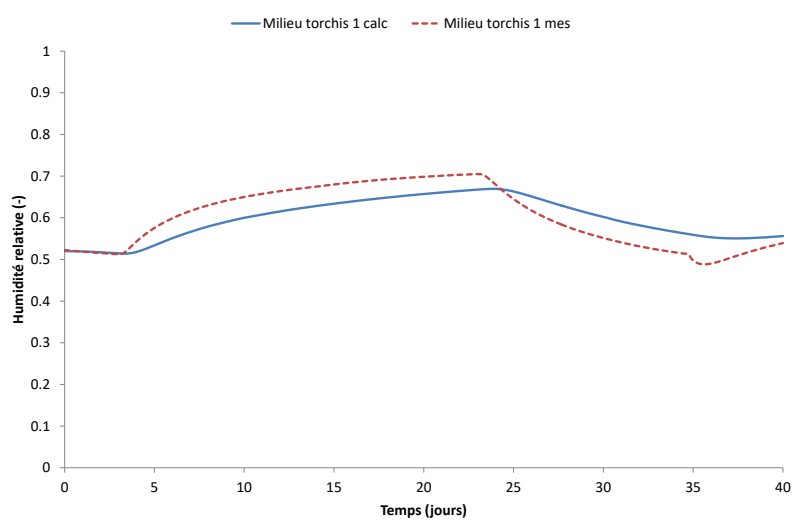


Figure 51 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du torchis

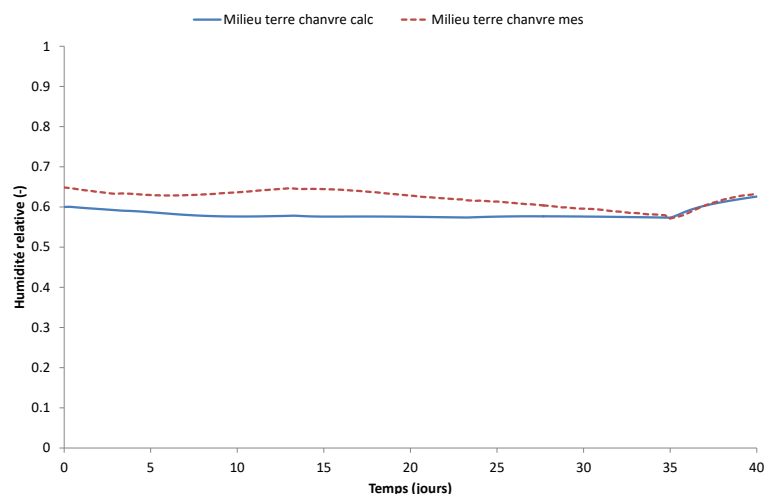


Figure 52 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du terre chanvre

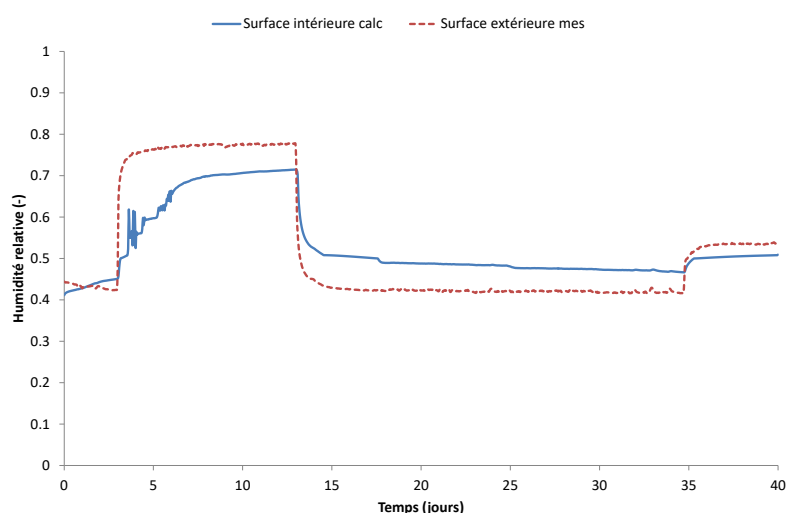


Figure 53 : Humidités relatives mesurées et calculées à la surface intérieure du mur en terre chanvre

Les mêmes remarques peuvent être notées pour ces confrontations que celles observées pour la partie en combijute. Il y a un bon accord pour les températures mais des écarts qui n'excèdent pas les 10 % existent pour les humidités relatives.

Nous observons également que lors d'un échelon (Figure 53), la montée et la descente en humidité relative peuvent subir un retard à cause de la méthode numérique. Au contraire, dans la Figure 50 on observe un bon comportement du modèle numérique au cours de l'échelon imposé.

Dans cette partie du travail, nous avons développé un code de calcul et des mesures expérimentales pour appréhender le comportement thermique de murs en torchis dotés d'une isolation hygroscopique et géo ou biosourcée. Ce type de matériau est adapté aux bâtiments anciens à colombage dont nature des matériaux est hygroscopique. Le code de calcul est validé malgré quelques incertitudes sur les humidités relatives. A partir de ces outils, nous allons poursuivre ce travail pour proposer une détermination du coefficient de transmission surfacique de ces murs en tenant compte des transferts couplés de chaleur et humidité. Un modèle inverse sera utilisé pour estimer ce paramètre à partir des mesures et du code de calcul. Les objectifs de ce projet sont en phase avec les exigences de la Réglementation environnementale RE 2020.

3.8. Expérimentations In-situ sur un bâtiment à Puiseux-en-Bray

Les expérimentations ont eu lieu dans un bâtiment résidentiel (Figure 54) mis à disposition par l'Entreprise Monsieur Degrave à Puiseux-en-Bray dans l'Oise. C'est un bâtiment à colombage avec remplissage des murs avec du torchis allégé. Cette construction a déjà servi à mener des expérimentations dans le projet BAUCH.



Figure 54 : Bâtiment démonstrateur à Puiseux-en-Bray dans l'Oise pour le test des solutions ITI terre chanvre et combijute



Figure 55 : Installation de l'ITI terre chanvre avec latte en bois et finition en enduit de terre



Figure 56 : Installation de l'ITI combijute avec frein vapeur et finition en fermacell

Les expérimentations se sont déroulées dans une pièce du bâtiment résidentiel servant comme bureau (Figure 54). La paroi choisie pour les tests est un mur orienté ouest sur lequel a été installé deux isolants hygroscopiques juxtaposés : terre chanvre avec finition enduit terre et combijute avec finition Fermacell.

La partie en isolation avec combijute est dotée d'un frein vapeur Intello avec un coefficient S_d de résistance à la vapeur d'eau variable et d'un doublage en Fermacell (Figure 56). Celle en terre chanvre est dotée d'un enduit terre (Figure 55). Les emplacements des sondes sont indiqués par des cercles rouges sur la Figure 57 pour l'ITI combijute et sur la Figure 58 pour l'ITI terre chanvre.

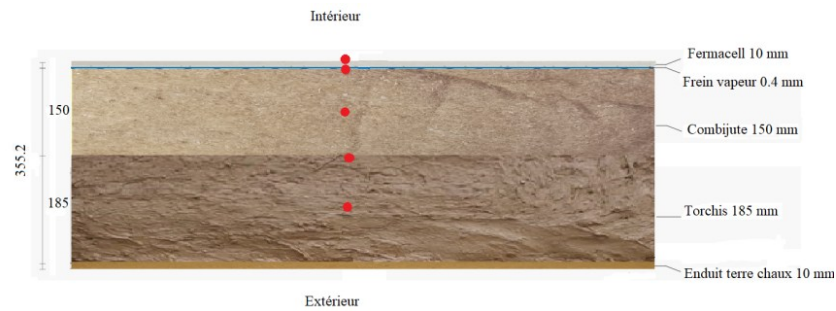


Figure 57 : Isolation de mur en torchis avec le combijute et position des capteurs de température et humidité

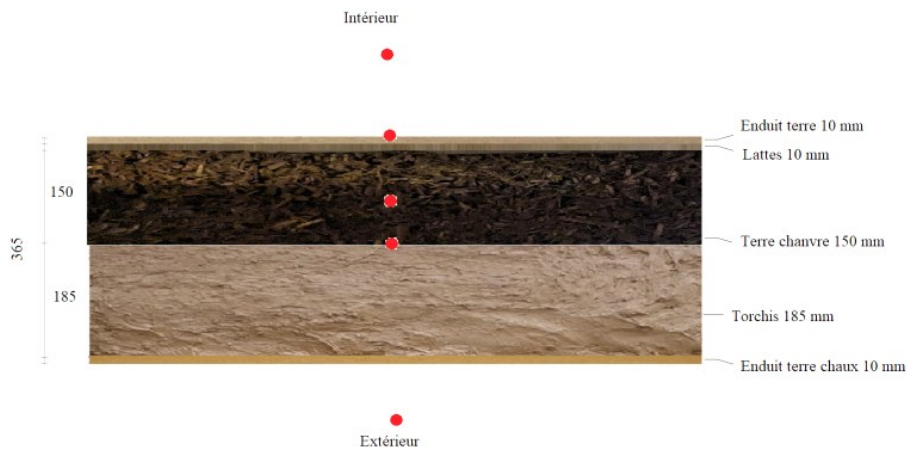


Figure 58 : Isolation de mur en torchis avec la terre chanvre et position des capteurs de température et humidité



Figure 59 : Installation d'un pyranomètre et de l'abri météorologique pour le capteur T & HR (image à gauche) et d'un Data logger MSR avec sondes (image à droite)

Les sondes de la société MSR ont été retenues [23] et permettent de mesurer simultanément les températures et les humidités relatives avec une précision de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ et $\pm 2\%$ HR. Ces sondes sont munies d'une membrane imperméable à l'eau liquide qui empêche son contact avec la partie capacitive. Un data logger avec batterie est programmé pour l'enregistrement des données recueillies sans nécessité d'être branché à une prise électrique (Figure 59). Les mesures peuvent être enregistrées pendant une durée de plusieurs mois sans alimentation électrique.

De plus, un pyranomètre Kip & Zonen a été installé sur la paroi extérieure pour mesurer le rayonnement solaire global reçu. Enfin, un abri météorologique a été fixé avec en son sein une sonde pour mesurer la température et l'humidité relative extérieure (Figure 59). Le système d'acquisition de données pour les deux types d'isolation est présenté en

Figure 60.

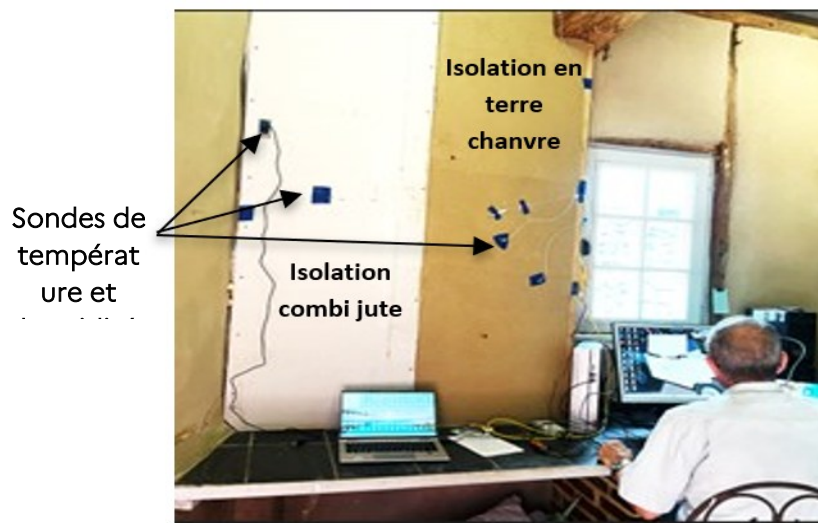


Figure 60 : Protocole expérimental et acquisition de données pour les deux types d'isolation

La thermographie infrarouge a été utilisée à l'aide d'une caméra Fluke 32 pour la visualisation des éventuels défauts au niveau de la paroi ou à la suite de l'installation des deux types l'ITI.

Les thermogrammes permettent de vérifier les températures de surface intérieure (Figure 61) et extérieure (Figure 62 pour l'ITI chanvre terre et Figure 63 pour le combijute) mesurées par les sondes MSR. L'analyse de ces images a permis de constater la bonne conformité des mesures par sondes de contact pour les températures. De plus, les thermogrammes montrent une homogénéité des températures et l'absence de défauts dans parties courantes objets des mesures. En revanche la thermographie ne nous permet pas de mesurer les humidités relatives des surfaces visées.

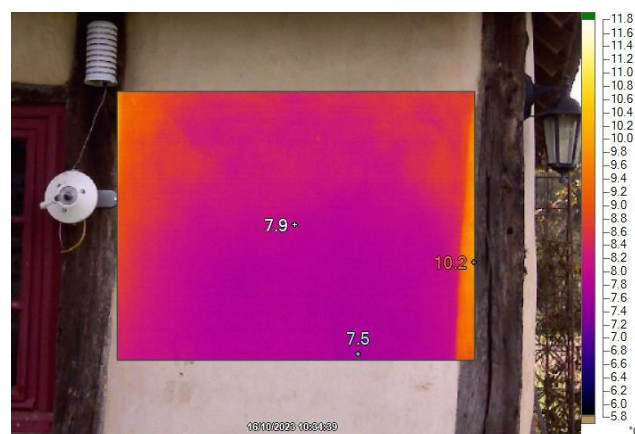


Figure 61 : Thermogramme surface extérieure du mur en colombages à Puiseux en Bray

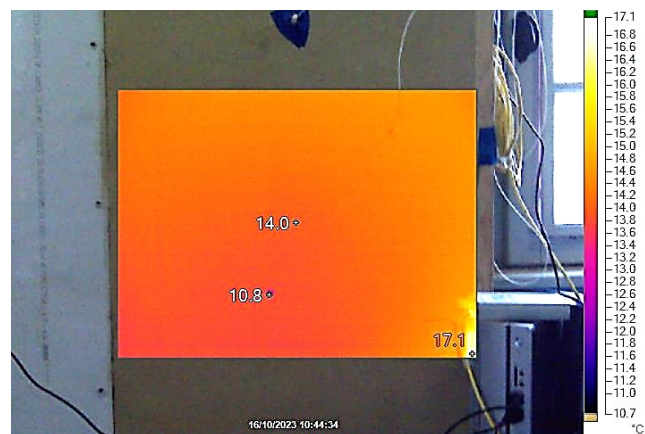


Figure 62 : Thermogramme surface intérieure de l'ITI chanvre terre avec finition enduit terre

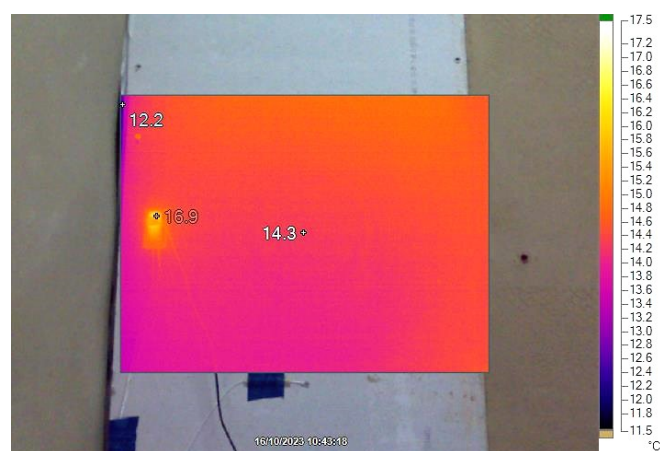


Figure 63 : Thermogramme surface intérieure de l'ITI combijute avec finition fermacell

3.9. Résultats des mesures In-Situ d'un bâtiment à Puiseux-en-Bray

Les conditions météorologiques extérieures de températures et humidité relatives ont été relevées par une sonde MSR placée dans un abri météo. Le rayonnement solaire reçu par la face extérieure du mur en colombage est mesuré par un pyranomètre Kipp&Zonen. Dans un premier temps, nous présentons les relevés du 26 juin au 10 octobre 2023 (Figure 64 à Figure 66).

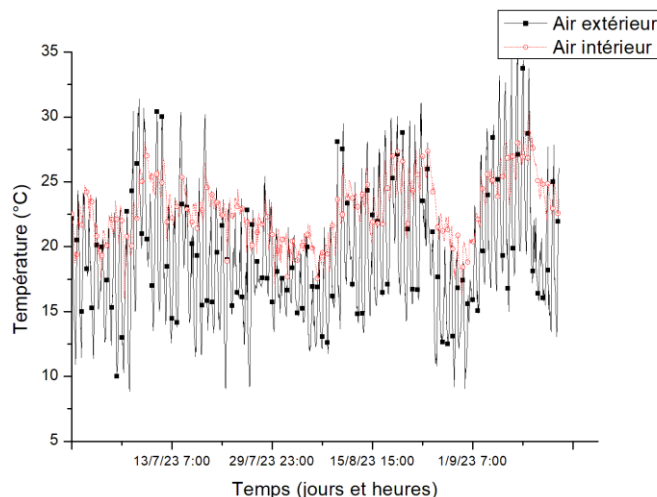


Figure 64 : Température intérieure et extérieure de l'air

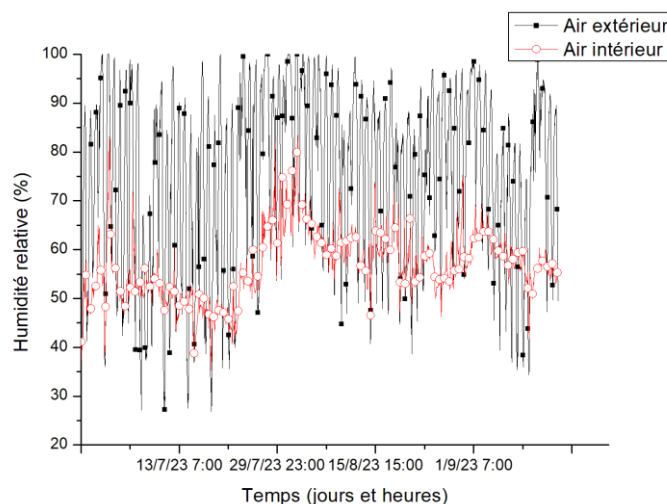


Figure 65 : Humidité relative intérieure et extérieure de l'air

Nous remarquons d'emblée que l'été 2023 a été très pluvieux avec des humidités relatives à 100 % (Figure 65) et des températures très variables entre 10 et 35 °C selon les journées (Figure 64). L'idéal aurait été un été sec qui aurait permis le séchage du mur en torchis et qui par conséquent auraient favorisé le séchage des couches d'isolant. Le rayonnement solaire global est relevé par un pyranomètre relié à un data logger spécifique alimenté par des piles électriques. On peut remarquer sur la Figure 66 qu'une période de mesures n'a pas été enregistrée à cause du non-remplacement des batteries.

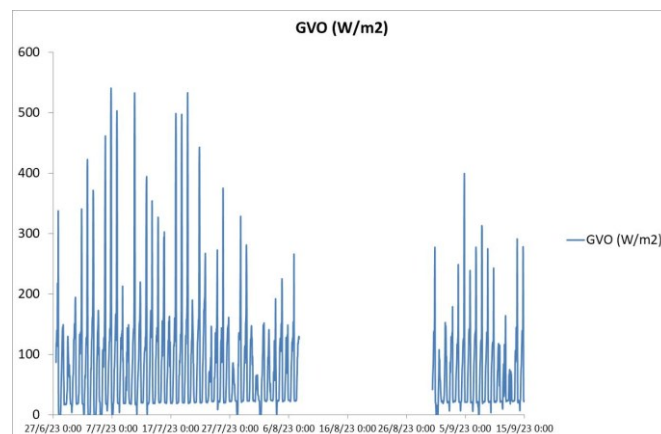


Figure 66 : Évolution du rayonnement global reçu par le mur extérieur orienté ouest

Dans un premier temps, nous avons analysé les mesures sur la partie du mur isolée en combijute. Les relevés de températures et humidité sont illustrées en Figure 67. La partie isolée en terre chanvre n'avait pas séchée suffisamment au cours de l'été 2023 ; des pointes à 100 % d'humidité ont été relevées (Figure 70). Par la suite, à partir du mois d'octobre 2023 le terre chanvre a baissé en humidité relative jusqu'à 80 %. Cependant, l'interface terre chanvre torchis est restée à 100 % (Figure 68).

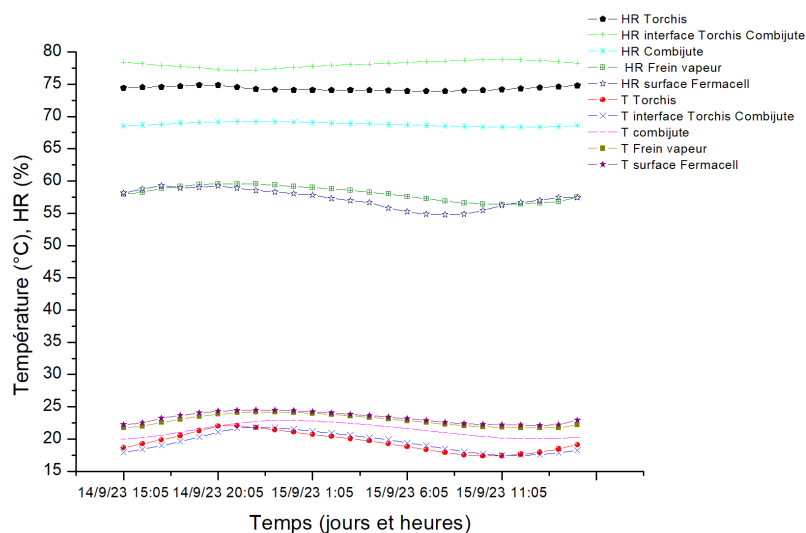


Figure 67 : Évolution des températures et humidités relatives dans les différentes couches du mur avec combijute

La partie du mur en combijute indique que l'isolant est resté dans une fourchette entre 60 et 75 % d'humidité relative (Figure 67 et Figure 72). Le torchis qui était à 75 % en été a atteint les 90 % environ au mois de janvier. Ces valeurs montrent le caractère fortement hygroscopique du remplissage en torchis. Le combijute permet un transfert d'humidité en son sein ce qui diminue de la charge sur la couche en torchis. Un isolant non hygroscopique aurait empêché ce transfert ce qui aurait entraîné la saturation des autres couches du mur.

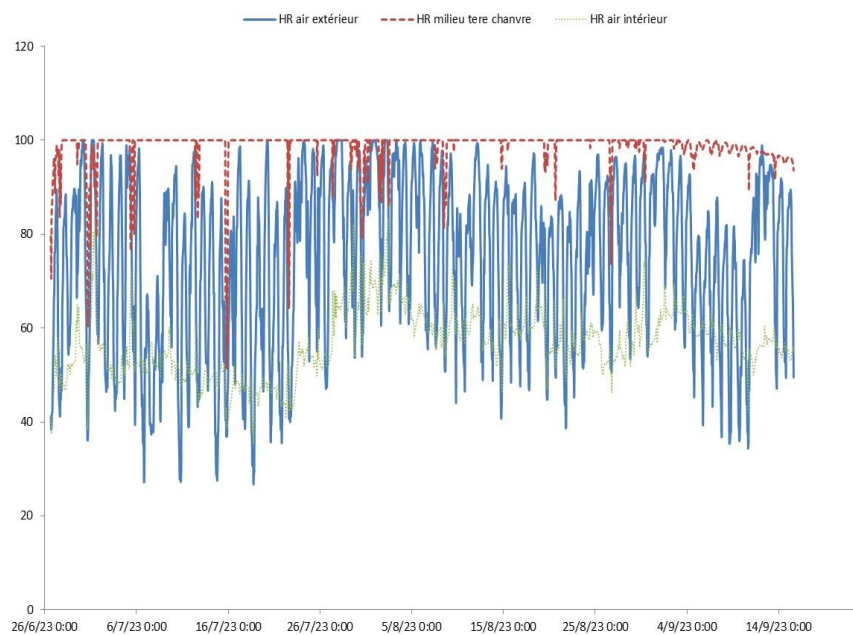


Figure 68 : Évolution de l'humidité relative terre chanvre

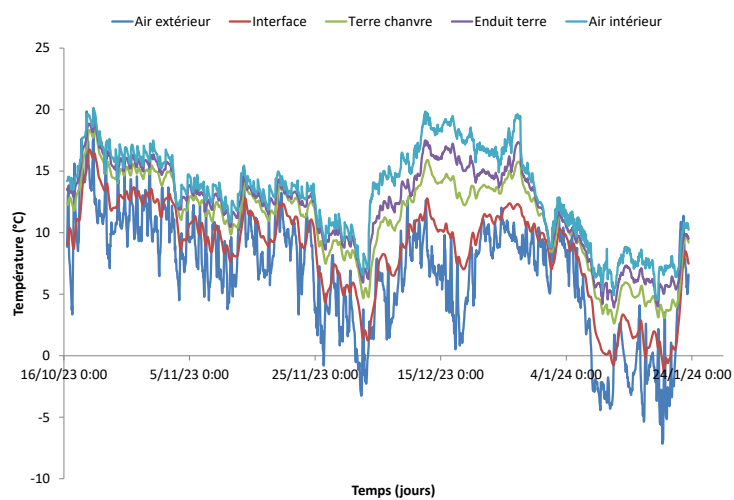


Figure 69 : Évolution de la température mur en terre chanvre (octobre à janvier)



Figure 70 : Évolution de l'humidité relative mur en terre chanvre (octobre à janvier)

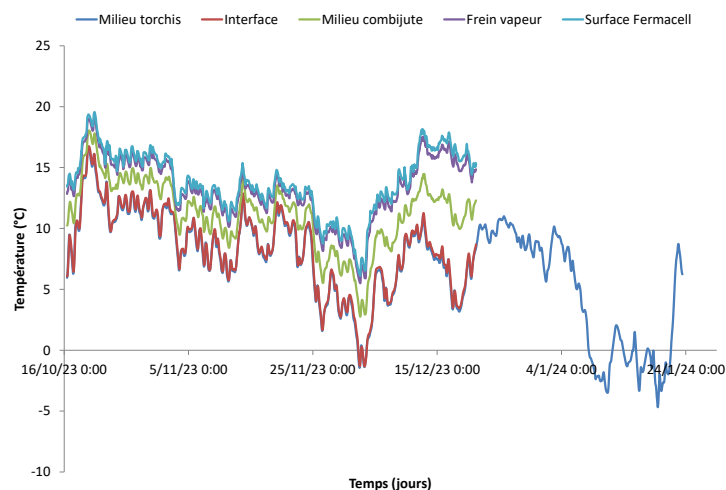


Figure 71 : Évolution de la températures mur en combijute (octobre à janvier)

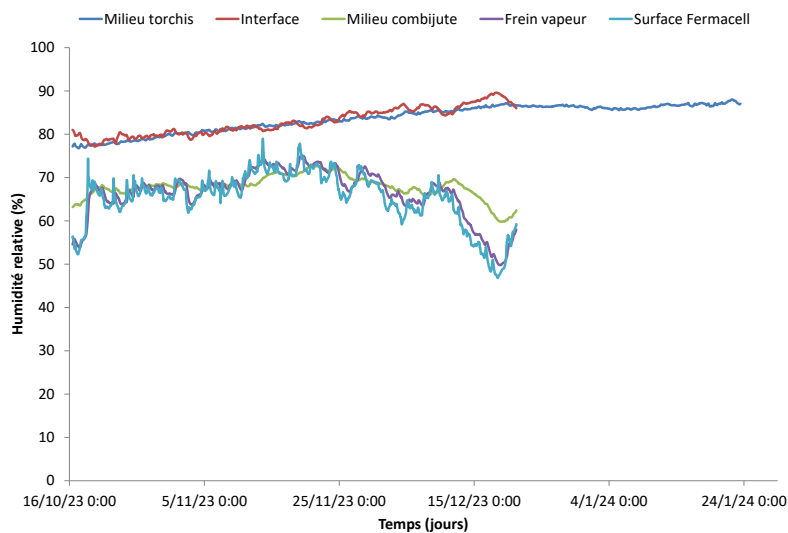


Figure 72 : Évolution de l'humidité relative mur en combijute (octobre à janvier)

Par la suite, l'observation des données météorologiques montre qu'entre janvier et juillet des pointes à 100 % d'humidité relative sont enregistrées (Figure 73). Ce qui a contribué à charger les couches d'enduit extérieur et de torchis qui restent entre 80 et 95 % (Figure 75).

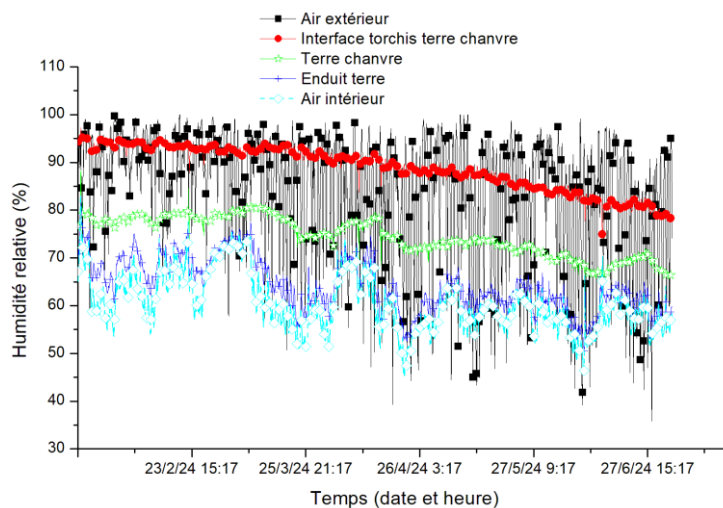


Figure 73 : Évolution de l'humidité relative mur avec terre chanvre (janvier à juillet)

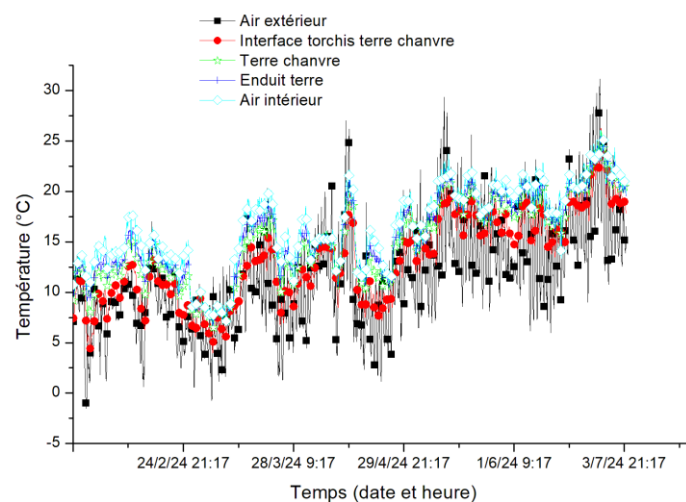


Figure 74 : Évolution de la température mur avec terre chanvre (janvier à juillet)

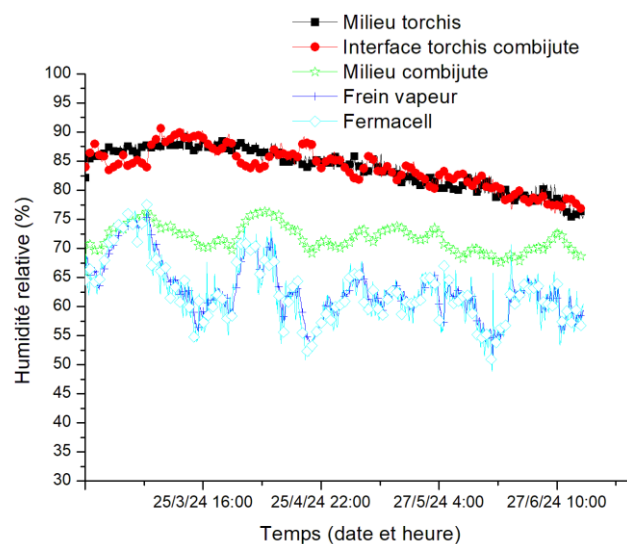


Figure 75 : Évolution de l'humidité relative mur avec combijute (janvier à juillet)

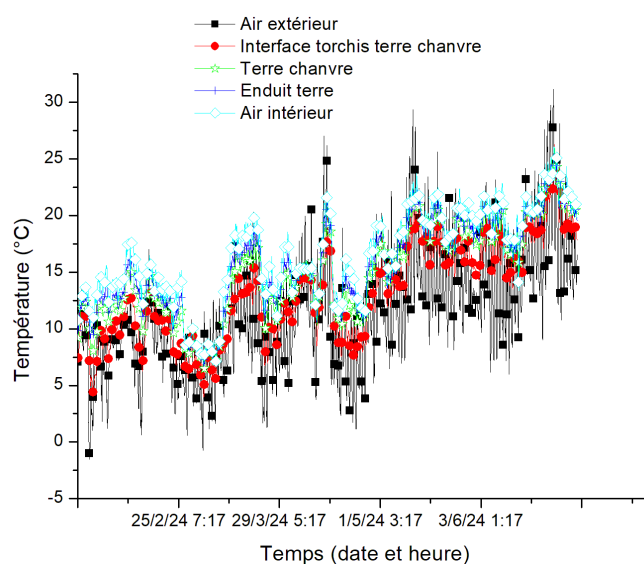


Figure 76 : Évolution de l'températures mur avec combijute (janvier à juillet)

L'analyse de plus d'une année de mesures sur site dans la maison Degrave a permis de tirer plusieurs enseignements. Le site de Puiseux en Bray situé dans les Hauts de France est soumis à des épisodes pluvieux fréquents même en été. Le mur ouest sur lequel l'entreprise Degrave a posé deux types d'isolant a eu un comportement hygrothermique caractérisé par, d'une part, des couches extérieures de torchis et d'enduit extérieur qui sont restés à des niveaux d'humidité élevés avec des pointes à 100 %. En d'autres termes le bâtiment reste soumis à une charge hydrique quasi continue. D'autre part, les deux isolants testés ont eu chacun un comportement différent. Le combijute est celui qui a subi le moins de transfert d'humidité. Le terre chanvre a été celui qui a mis un temps assez long pour sécher mais qui par la suite est resté sur des niveaux entre 80 et 90 %.

Une première recommandation serait, lors de la mise en place de cet isolant, de ne pas poser l'enduit intérieur en terre immédiatement. Il est important de laisser sécher le terre chanvre pendant au moins un mois avant de poser l'enduit intérieur. Une autre possibilité est d'utiliser un déshumidificateur pendant la pose du terre chanvre et ensuite celle de l'enduit intérieur. La saisonnalité constitue également un facteur déterminant pour optimiser la mise en œuvre de la solution terre-chanvre.

3.10. Confrontation des simulations numériques aux mesures In-Situ du bâtiment à Puiseux-en-Bray

3.10.1. Isolation avec combijute

Dans un premier temps, les données mesurées pendant l'été 2023 de juin à septembre ont été utilisées. La partie du mur en terre chanvre est restée à environ 100 % d'humidité relative et n'avait donc pas séchée. Par conséquent, pour cette période seule la partie du mur comprenant une isolation par l'intérieur avec combijute est traitée.

Les évolutions des températures et humidités relatives calculées par le modèle HAM-tools présentées en détail dans les documents années [11] et les mesures par sondes MSR dans différentes profondeurs du mur isolé en combijute sont affichées dans la Figure 77 à la Figure 78.

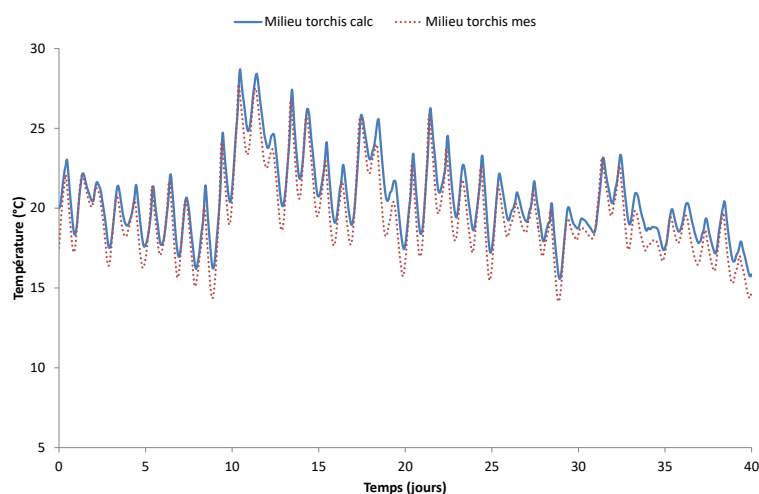


Figure 77 : Variation de la température au milieu de la couche de torchis

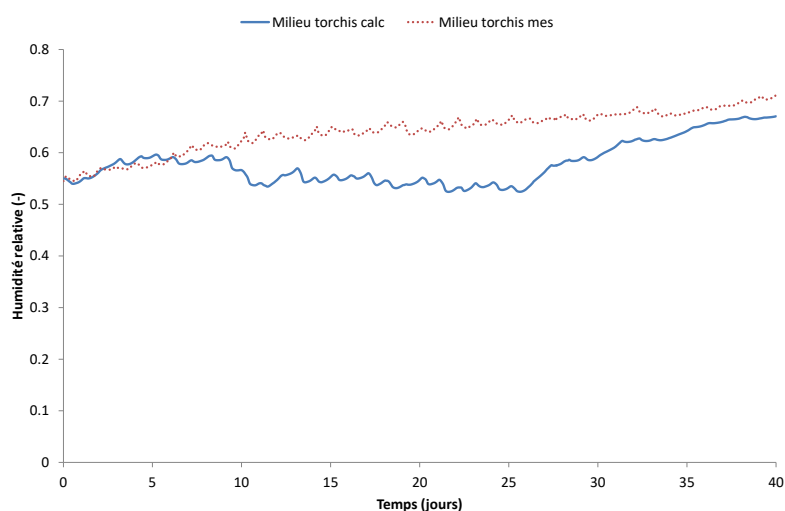


Figure 78 : variation : de l'humidité relative au milieu de la couche de torchis

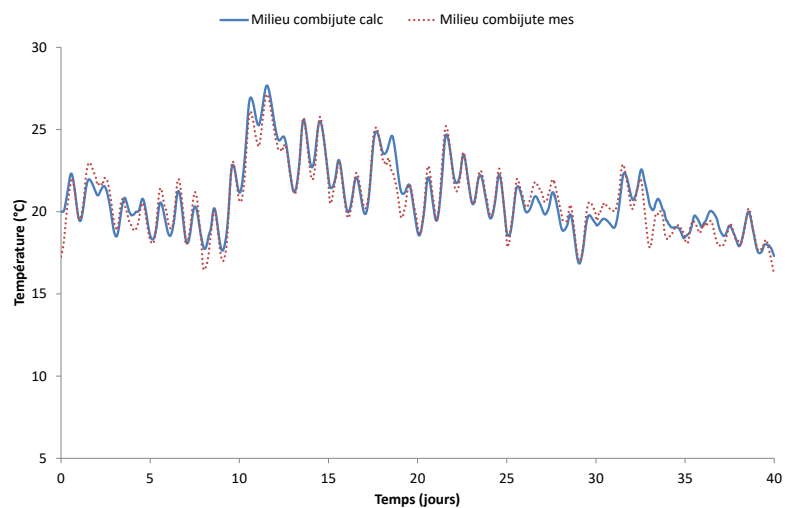


Figure 79 : Évolution de la température au milieu de l'isolant en combijute

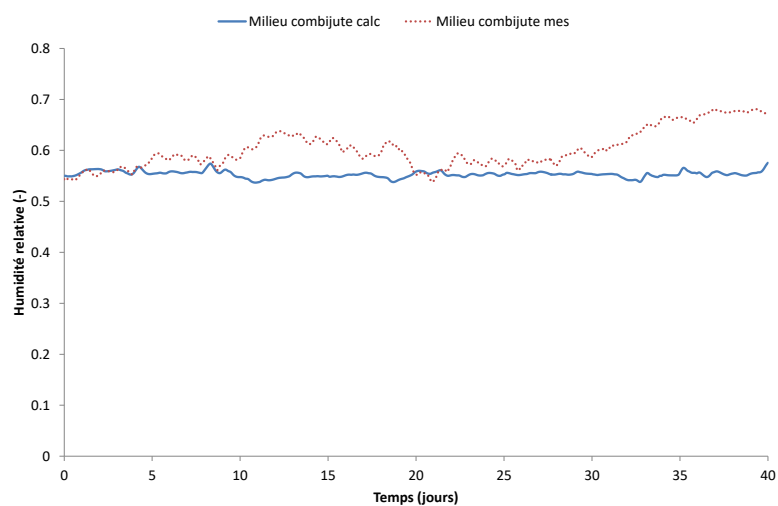


Figure 80 : Évolution de l'humidité relative au milieu de l'isolant en combijute

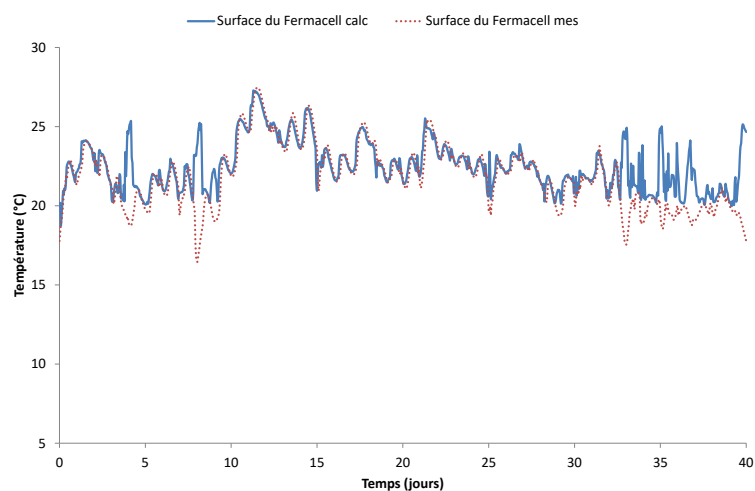


Figure 81 : Variation de la température sur la surface du Fermacell

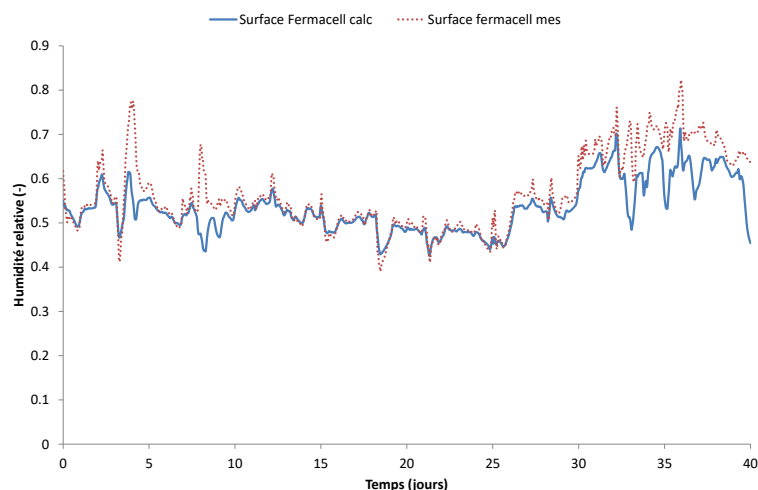


Figure 82 : Variation de l'humidité relative sur la surface du Fermacell

Les résultats présentés montrent que l'estimation des variations de température au sein de différentes profondeurs de la paroi avec ITI combijute est en accord avec les mesures expérimentales. Pour les évolutions des humidités relatives quelques écarts d'environ 10 % apparaissent au cours d'une journée pour le Fermacell, le torchis et le combijute. Dans la période du dixième et trentième jour l'accord satisfaisant est noté.

Ces résultats indiquent clairement que l'utilisation du modèle HAM-tools peut être utilisé pour prédire avec bonne fidélité l'évolution de la température et avec une relative précision celle de l'humidité. Toutefois comme cela a été déjà obtenue dans le cas pour le mur test au laboratoire, l'estimation de la variation de l'humidité relative reste acceptable avec dans certain cas un écart maximal de 10 % entre les mesures et la simulation numérique.

3.10.2. Isolation avec Terre chanvre

Les données enregistrées du 24 janvier au 23 février 2024 montrent que le terre chanvre avait séché en grande partie. Il a été possible après une longue période d'attente du séchage d'exploiter les mesures pour effectuer des confrontations par rapport au modèle HAM-tools. Les résultats sont illustrés dans les figures 55 à 58.

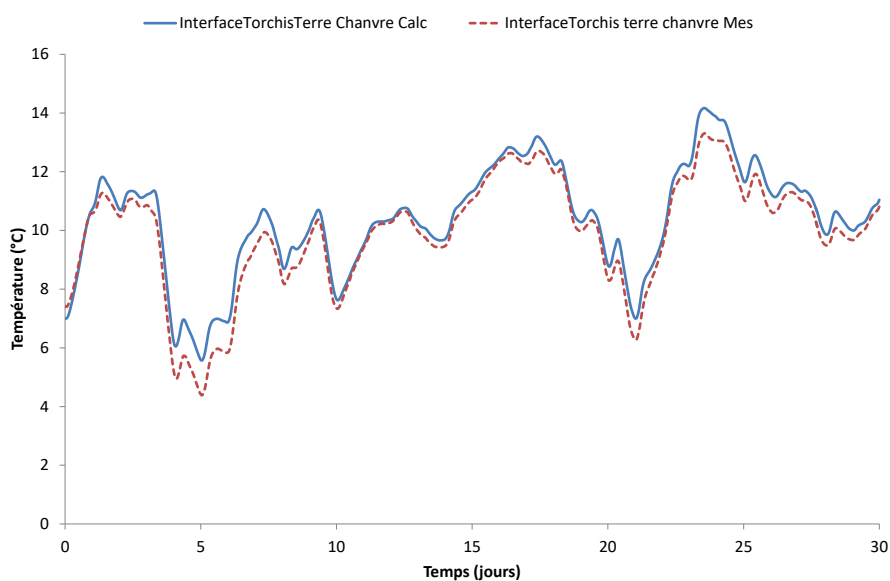


Figure 83 : Température calculées et mesurées à l'interface du terre chanvre et du torchis

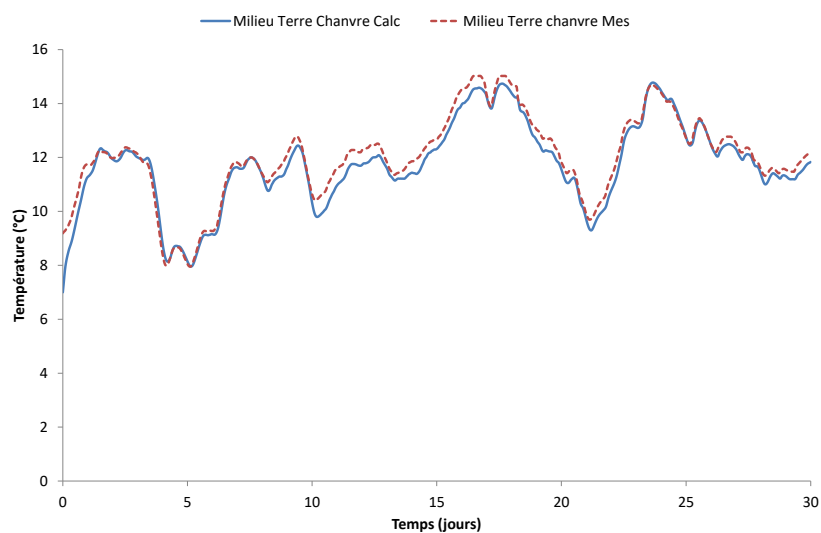


Figure 84 : Températures calculées et mesurées au milieu du terre chanvre

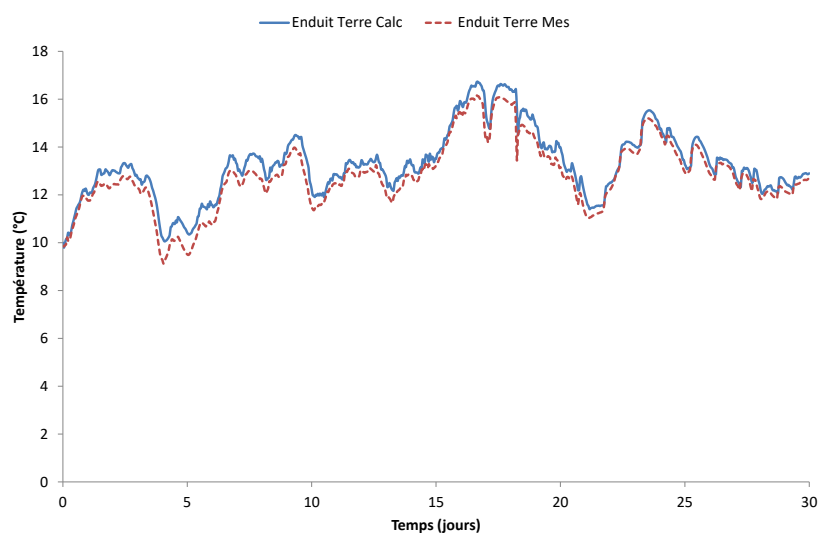


Figure 85 : Températures calculées et mesurées à la surface de l'enduit terre

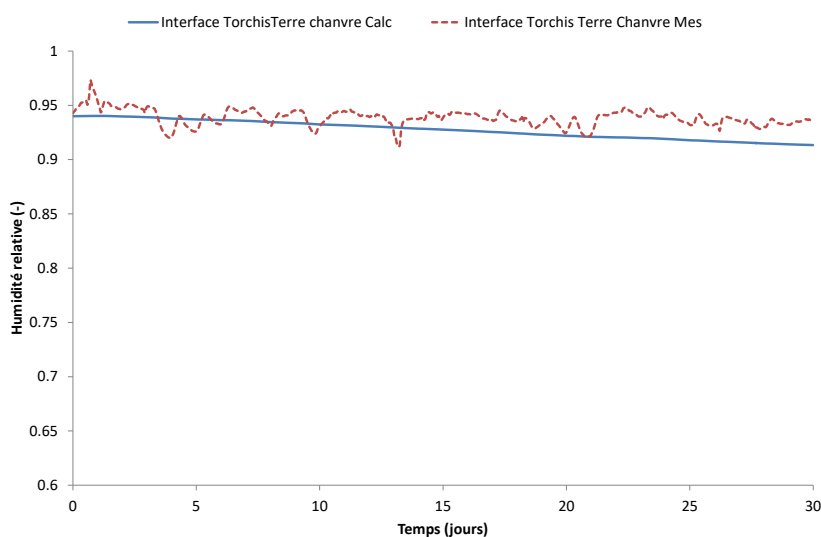


Figure 86 : Humidités relatives calculées et mesurées à l'interface terre chanvre torchis

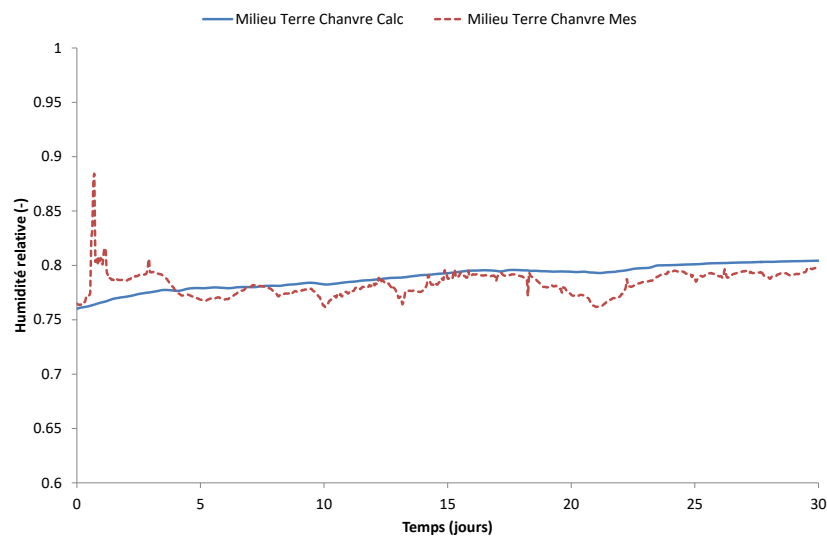


Figure 87 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du terre chanvre

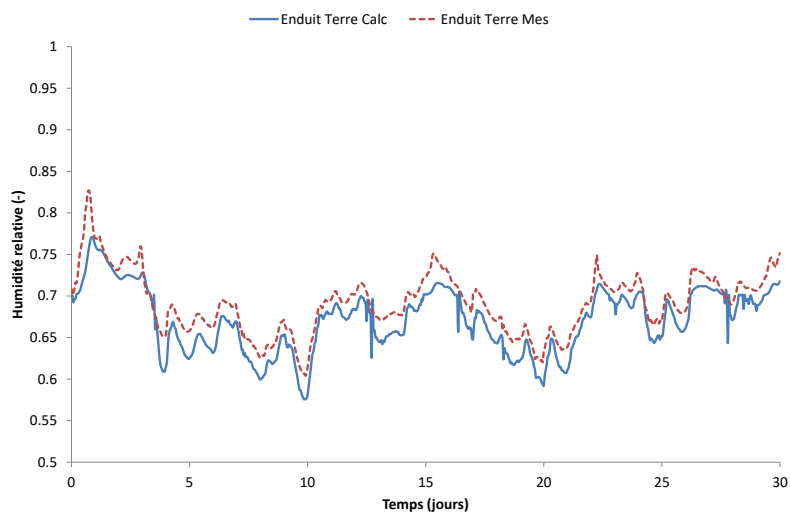


Figure 88 : Humidités relatives calculées et mesurées à la surface de l'enduit terre

Nous poursuivons les comparaisons sur la partie du mur en terre chanvre pour la période du 21 avril 30 mai 2024. Les résultats sont exposés dans la Figure 89 à la Figure 94.

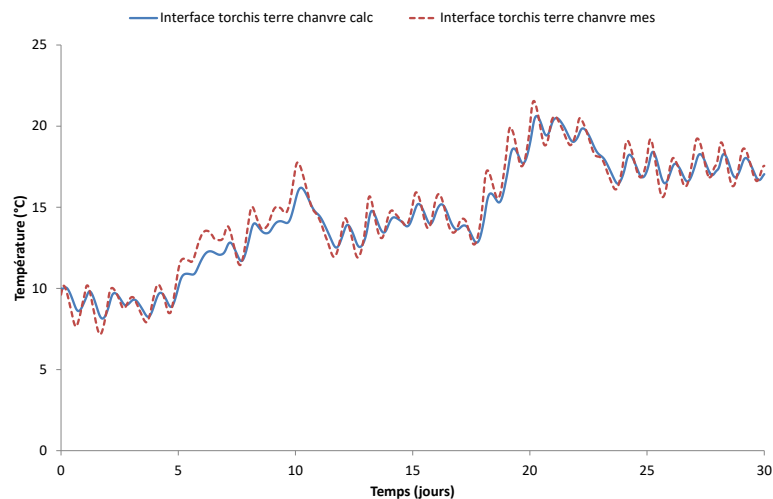


Figure 89 : Températures mesurées et calculées à l'interface torchis terre chanvre

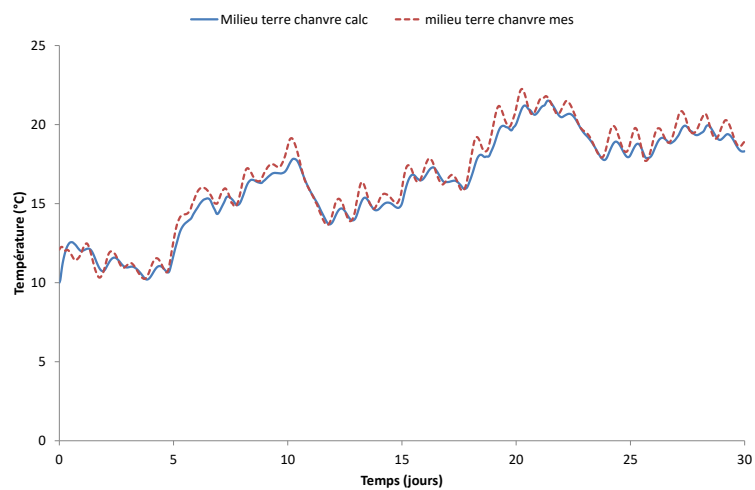


Figure 90 : Températures mesurées et calculées milieu du terre chanvre

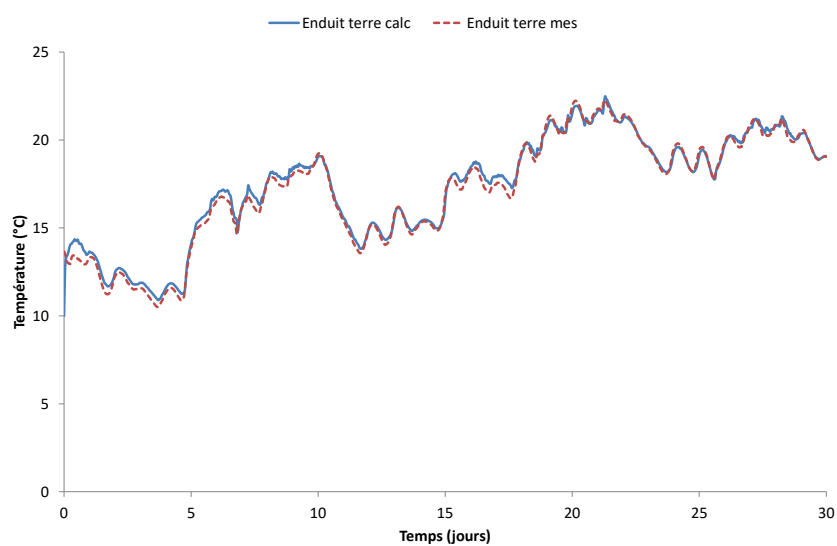


Figure 91 : Températures calculées et mesurées à la surface de l'enduit terre

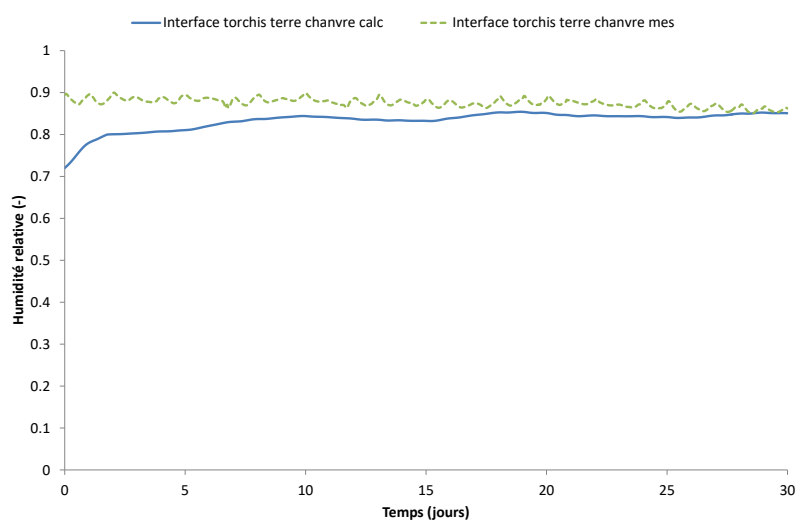


Figure 92 : Humidités relatives calculées et mesurées à l'interface torchis terre chanvre

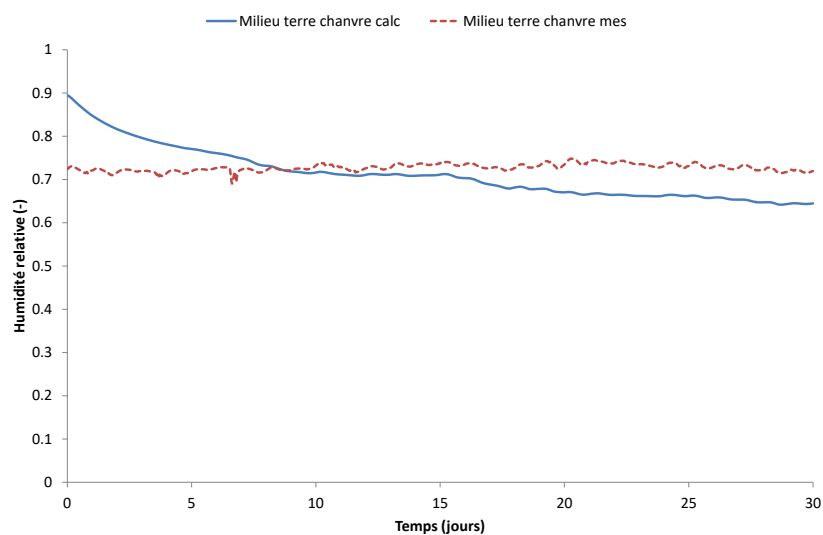


Figure 93 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du terre chanvre

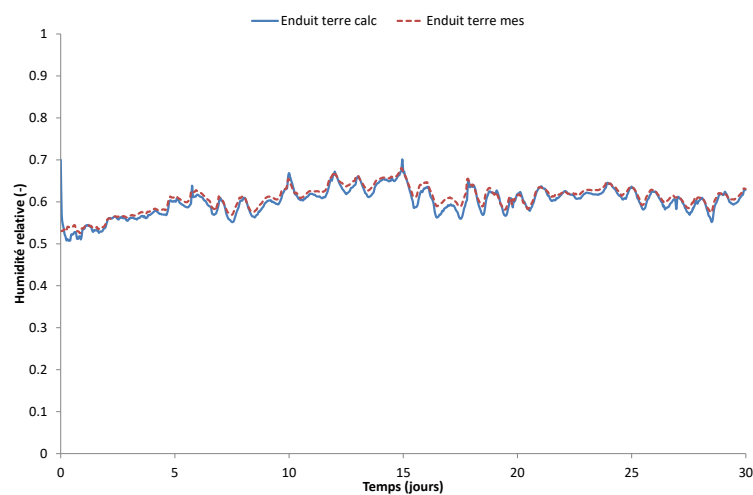


Figure 94 : Humidités relatives calculées et mesurées à la surface de l'enduit terre

Nous présentons également les confrontations entre le modèle HAM-tools et les expérimentations pour le mur avec isolation en combijute pour la période du 21 avril 30 mai 2024 (Figure 95 à Figure 102).

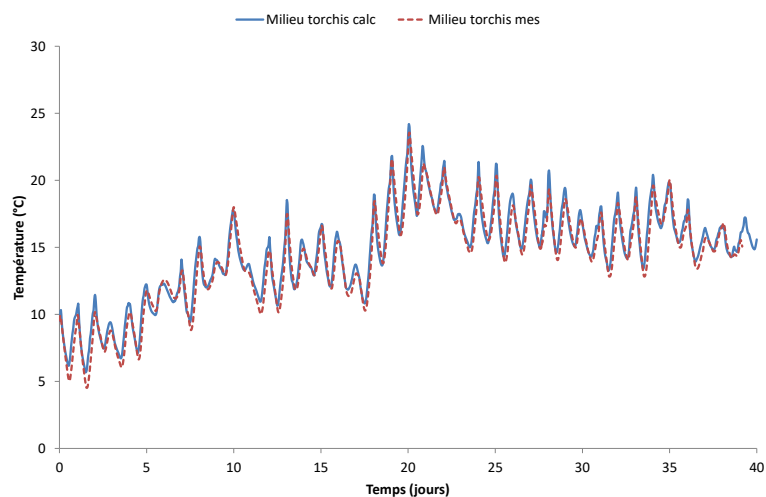


Figure 95 : Températures calculées et mesurées au milieu du torchis

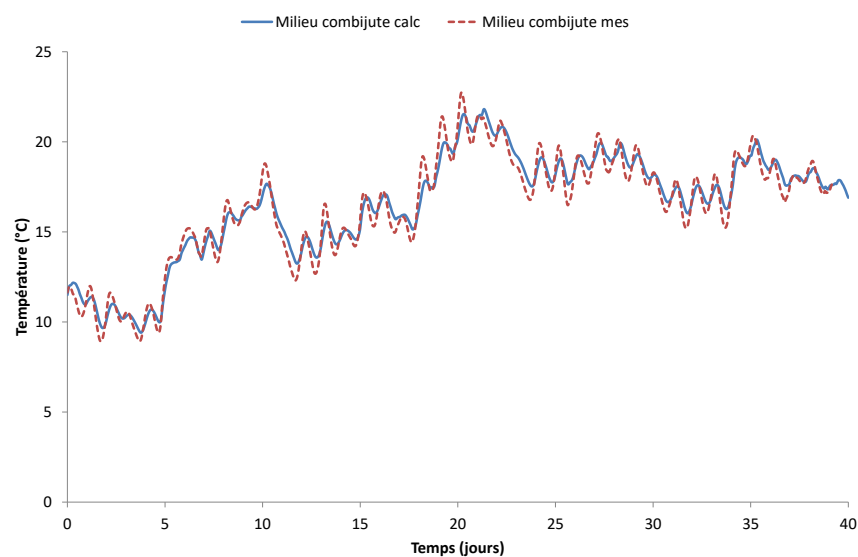


Figure 96 : Températures calculées et mesurées au milieu du combijute

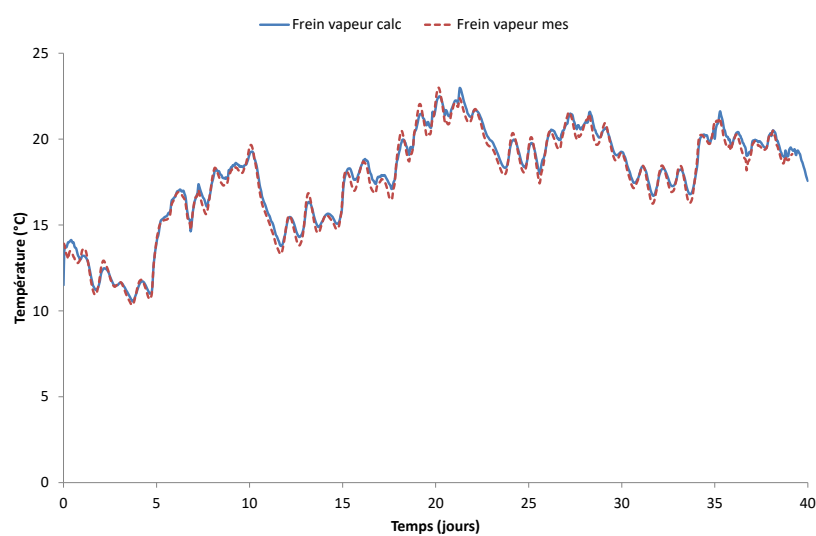


Figure 97 : Températures calculées et mesurées au niveau du frein vapeur

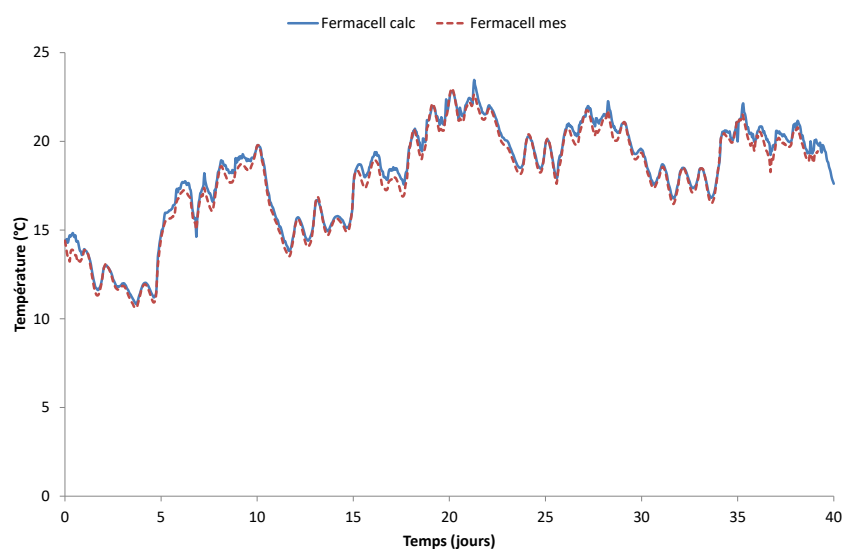


Figure 98 : Températures calculées et mesurées à la surface du Fermacell

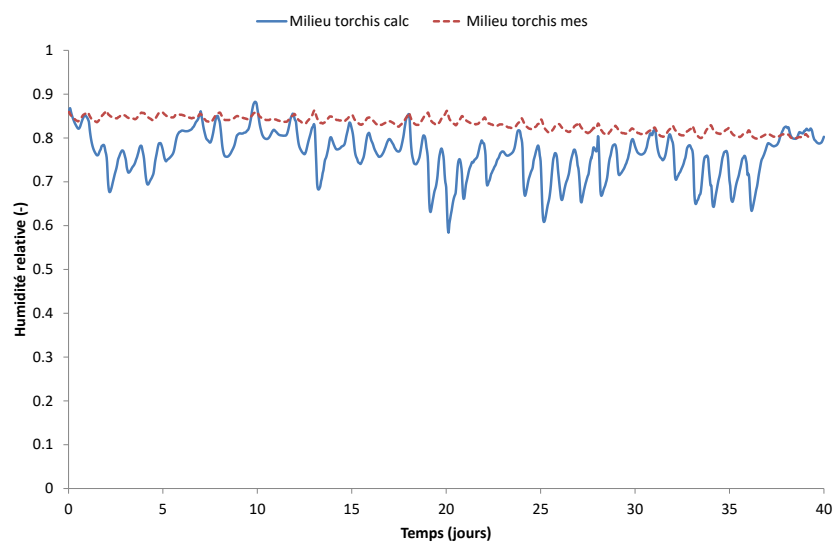


Figure 99 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du torchis

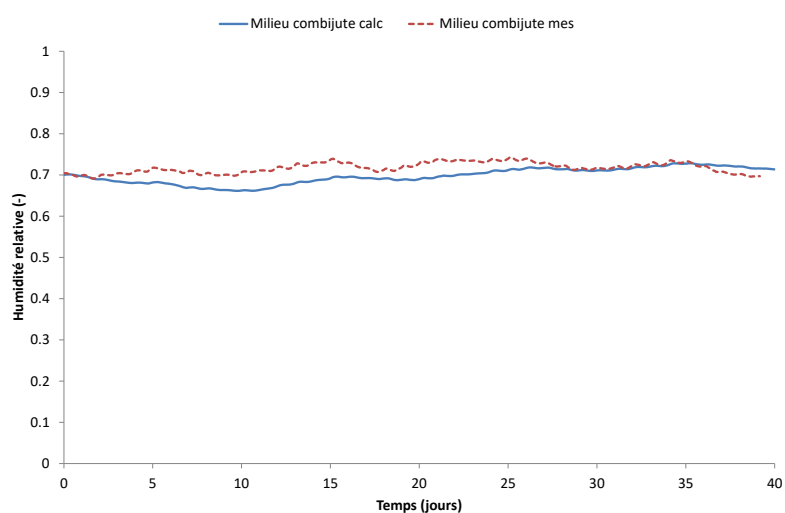


Figure 100 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du combijute

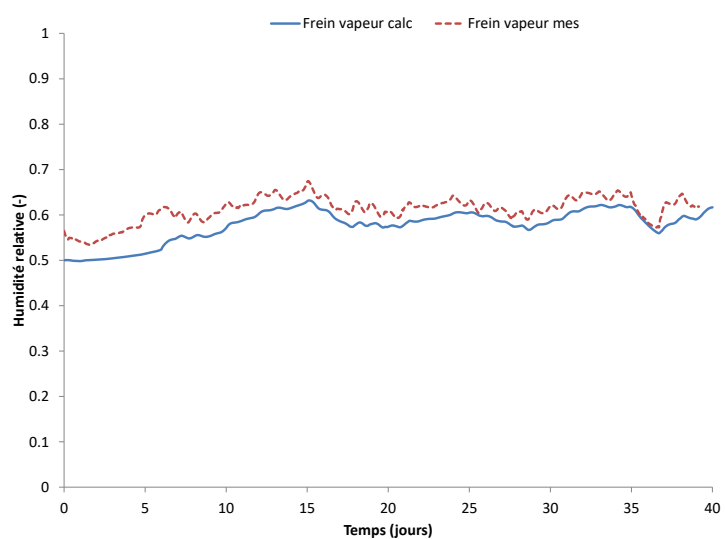


Figure 101 : Humidités relatives calculées et mesurées au niveau du frein vapeur

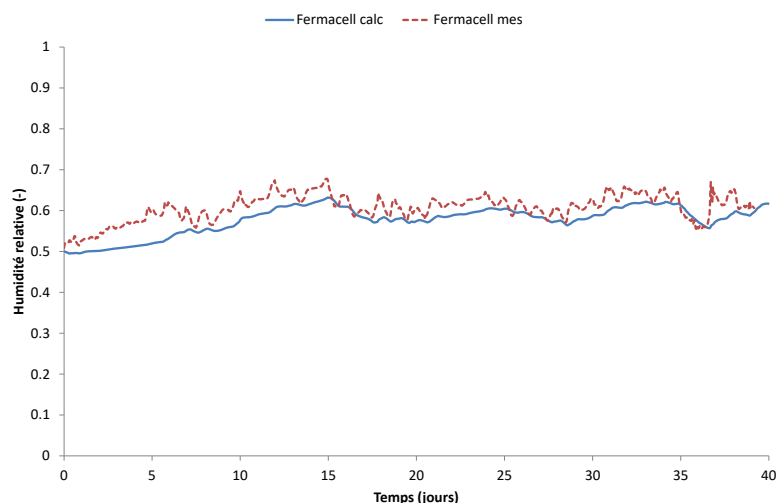


Figure 102 : Humidités relatives calculées et mesurées à la surface du Fermacell

L'évolution de la température calculée par le modèle HAM-tools et les mesures par sondes à différentes profondeurs du mur isolé en combijute et en terre chanvre montrent une bonne concordance. On voit clairement qu'il y a peu d'écarts entre les données de simulation numérique et celles mesurées par les capteurs tout au long du test d'une année sur site. Cependant, un léger décalage est observé et peut être attribué à des erreurs dans la position ou la précision du capteur, ou aux propriétés thermophysiques utilisées comme données d'entrée dans le modèle.

L'évolution de la variation d'humidité relative calculée par le modèle HAM-tools à différentes profondeurs du mur montre qu'il y a quelques écarts qui ne dépassent pas les 10 %. Dans ce cas, la sorption, la perméabilité à la vapeur ou la précision des capteurs peuvent probablement induire ces différences [24]. On peut également noter que les conditions météorologiques n'étaient pas favorables puisque la période estivale était pluvieuse et chaude. La simulation numérique a montré une plus grande concordance avec l'étude expérimentale sur le côté Fermacell du mur, car il était moins affecté par la pluie et les conditions extérieures. On peut donc conclure que les différences significatives observées entre les données expérimentales et numériques dans les sections de torchis et de combijute sont principalement attribuables aux conditions météorologiques.

Il sera donc également important d'étudier l'effet de la pluie sur la face extérieure du mur pour estimer son impact et réduire les écarts entre les données numériques et mesurées. Plus précisément, les caractéristiques thermophysiques utilisées comme paramètres d'entrée dans la simulation seront mesurées en fonction de la variation de température et du niveau d'humidité. De plus, la courbe de sorption et la perméabilité à la vapeur d'eau feront l'objet d'une étude paramétrique afin d'améliorer la dynamique hygrique du modèle [24].

3.11. Estimation du coefficient U de transmission surfacique

Les mesures expérimentales In-Situ menées par le CERTES à Puiseux en-Bray dans l'Oise constituent une base de données qui va nous permettre d'aborder la partie estimations de paramètres. Le code HAM-tools est le modèle que nous avons adapté et validé à nos différentes configurations pour simuler le comportement couplé de chaleur et d'humidité. Ces deux outils seront utilisés par des modèles d'estimation pour calculer les paramètres nécessaires à la détermination du coefficient U.

3.11.1. Méthode d'estimation de paramètres

L'estimation de paramètres est basée sur la minimisation de la méthode des moindres carrées non linéaires qui peut s'exprimer simplement par :

$$S1 = \sum_{j=1}^N [T_{mesure,j} - T_{calcul,j}(\beta)]^2 \quad (20)$$

Où T_{mesure} et T_{calcul} sont respectivement les mesures expérimentales et les calculs par HAM-tools de la température. Le même formalisme est utilisé pour l'humidité relative :

$$S2 = \sum_{j=1}^N [HR_{mesure,j} - HR_{calcul,j}(\beta)]^2 \quad (21)$$

N est le nombre total des températures et des humidités relatives prises en compte. β est le vecteur des paramètres dits inconnus à estimer.

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes d'estimation de paramètres, celle utilisée dans cette étude est la méthode de Levenberg-Marquardt [25] déjà implantée dans Matlab. C'est une combinaison entre la méthode du gradient et du Hessien. Nous partons d'un vecteur initial β_0 puis l'algorithme ajuste progressivement les valeurs de β pour rapprocher les mesures et calculs en procédant à la minimisation des écarts quadratiques S1 et S2 jusqu'à atteindre un β optimal.

3.11.1.1. Paramètres d'estimation

Dans les équations du modèle HAM-tools [26], les caractéristiques thermohydriques des matériaux utilisés sont données par :

$$\lambda = \lambda_{s,ref} + \lambda_T(T - T_{ref}) + \lambda_w(w - w_{ref}) \quad (22)$$

Dans HAM-tools la formulation est la suivante :

$$\lambda = \lambda_{s,ref} + \lambda_T T + \lambda_w w \quad (23)$$

T et w sont respectivement les températures et les taux d'humidités calculées à chaque pas de temps. λ_T et λ_w sont des paramètres de variation de la conductivité thermique sèche de référence $\lambda_{s,ref}$.

Nous considérerons ces trois paramètres comme inconnus ainsi que le coefficient h_e d'échange thermique avec la surface extérieure d'où notre vecteur $\beta = (\lambda_{s,ref}, \lambda_T, \lambda_w, h_e)$. Ainsi, la conductivité thermique sera fonction des températures et des taux d'humidités. Le corollaire est que le coefficient U sera dépendant de la température et du taux humidité. Nous rappelons que U est donné par :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_i}} \quad (24)$$

h_e et h_i respectivement coefficient d'échange thermique en surface extérieure et intérieure. e et λ respectivement épaisseur et conductivité thermique des différentes couches de matériau du mur.

Pour ce faire, la banque de données expérimentales in situ réalisée à Puiseux en Bray du 26 juin 2023 au 04 juillet 2024 va être utilisée avec comme critère le gradient de températures et humidités relatives entre la surface intérieure et le milieu de l'isolant.

3.11.2. Estimation mur avec ITI en combijute été 2023

Les mesures pour une période d'une vingtaine de jours du 06 au 26 juillet 2023 ont été utilisées. Le critère d'estimation est le vecteur des gradients des températures et des humidités relatives mesurées et calculées au milieu de l'isolant et de la surface intérieure. Le vecteur critère a été défini comme suit :

$$\text{Crit} = [\Delta(\text{HR}_{\text{intc}} - \text{T}_{\text{intm}}), \Delta(\text{HR}_{\text{cœurc}} - \text{HR}_{\text{cœurm}}), \Delta(\text{T}_{\text{intc}} - \text{T}_{\text{intm}})], \Delta(\text{T}_{\text{cœurc}} - \text{T}_{\text{cœurm}})] \quad (25)$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le même Tableau 4 pour voir les différences entre les deux méthodes : trra (trust region reflective algorithm) et lm (Levenberg-Marquardt).

Il est à préciser que pour ces méthodes il y a lieu d'initialiser les paramètres d'estimation. Pour ce faire deux possibilités ont été choisies :

$\beta_0 = (0.04, 0.00099, 0.00099, 20)$ que nous notons init1 et $\beta_0 = (0.04, 0.0001, 0.0001, 20)$ que nous notons int2.

Méthode et init	$\lambda_{s,\text{ref}} (\Delta\lambda_{s,\text{ref}}) \text{ W/m.K}$	$\lambda_T (\Delta\lambda_T) \text{ W/m.K}^2$	$\lambda_w (\Delta\lambda_w) \text{ W.Kg/m.K}^4$	$h_e (\Delta h_e) \text{ W/m}^2.\text{K}$
Trra , init1	0.0378 (0.0004)	0.0035 (0.0009)	0.00056 (0.0009)	19.97 (0.019)
Trra , init2	0.0402 (0.0006)	0.0001 (0.0002)	0.0001 (0.0004)	20.00 (0.0097)
Lm , init1	0.0293 (0.0005)	0.0156 (0.0004)	0.0013 (0.0002)	19.97 (0.007)
Lm , init2	0.0447 (0.0033)	0.0034 (0.0001)	0.0067 (0.0004)	19.97 (0.066)

Tableau 4 : Résultats d'estimation Puiseux en Bray 20 jours été 2023

Les courbes en Figure 103 et Figure 104 affichent les évolutions des différences de températures et humidités relatives calculées et mesurées dans le milieu de l'isolant et la surface intérieure pour la méthode Trra. Celles calculées avec la méthode Lm sont présentées en Figure 105 et Figure 106.

$\text{DT} = \text{T}_{\text{calculé}} - \text{T}_{\text{mesuré}}$ en °C.

$\text{DHR} = \text{HR}_{\text{calculé}} - \text{HR}_{\text{mesuré}}$ en %.

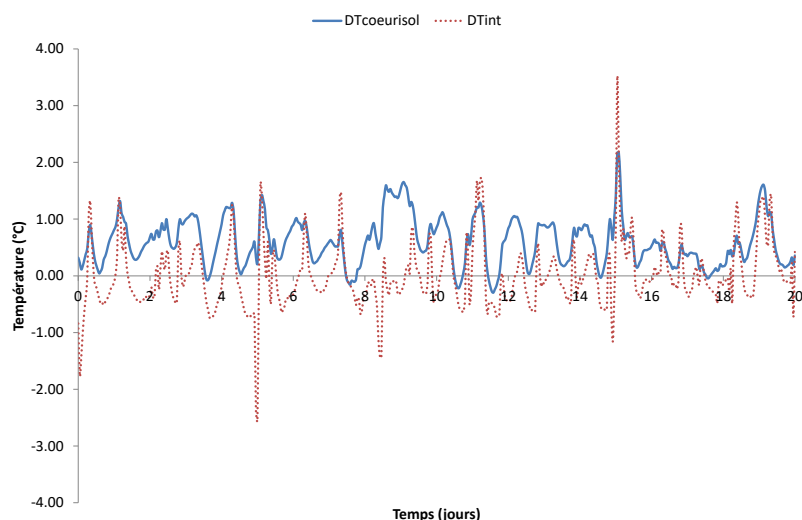


Figure 103 : Évolution des différences de températures critère trra1

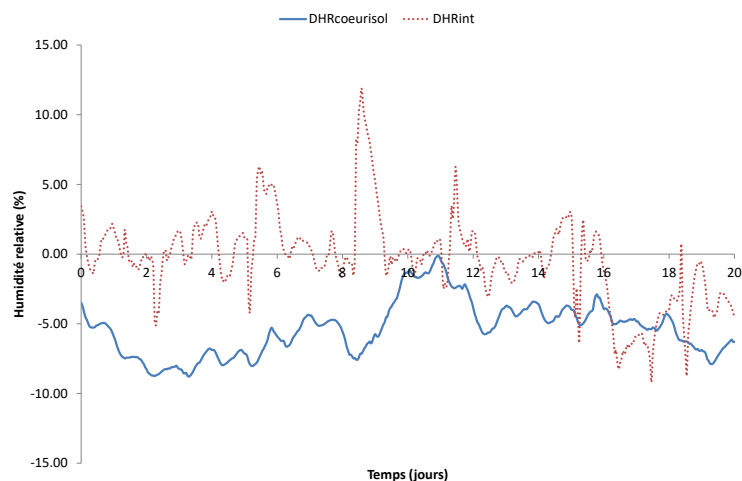


Figure 104 : Évolution des différences humidités relatives critère trra1

Dans la méthode de l'algorithme de la région de confiance, les différences de températures sont au maximum de 1°C pour le cœur d'isolant et peuvent atteindre 3°C pour les températures intérieures ce qui implique que l'estimation n'est pas satisfaisante. Cependant, ces écarts sont ponctuels et n'apparaissent que deux fois sur un ensemble de 480 données (vingt jours avec une heure de pas de temps). En revanche, pour les humidités relatives les écarts sont au maximum de 10 % ce qui reste dans ce cas acceptable.

Les mêmes remarques peuvent être apportées pour les résidus de l'estimation de paramètres avec la méthode Levenberg-Marquardt. C'est une preuve que ces algorithmes sont assez proches pour ce qui concerne les résidus. Cependant, les résultats d'estimation affichés dans le Tableau 4 sont différents selon l'algorithme ou le vecteur initialisation des paramètres. Il est à noter que les algorithmes fournissent des résultats par compensation ; lorsque la conductivité thermique sèche $\lambda_{s,ref}$ est augmentée, les facteurs λ_T et λ_w diminuent. Sachant que les données constructrices indiquent une conductivité thermique de l'isolant combijute de 0.04 W/m².K, nous garderons les valeurs de trra1 et lm2.

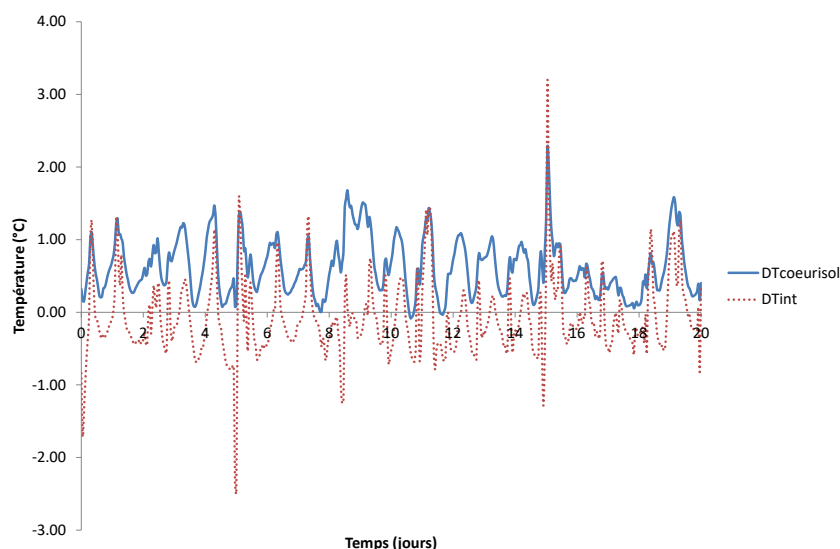


Figure 105 : Évolution des différences de températures critère méthode Levenberg-Marquardt

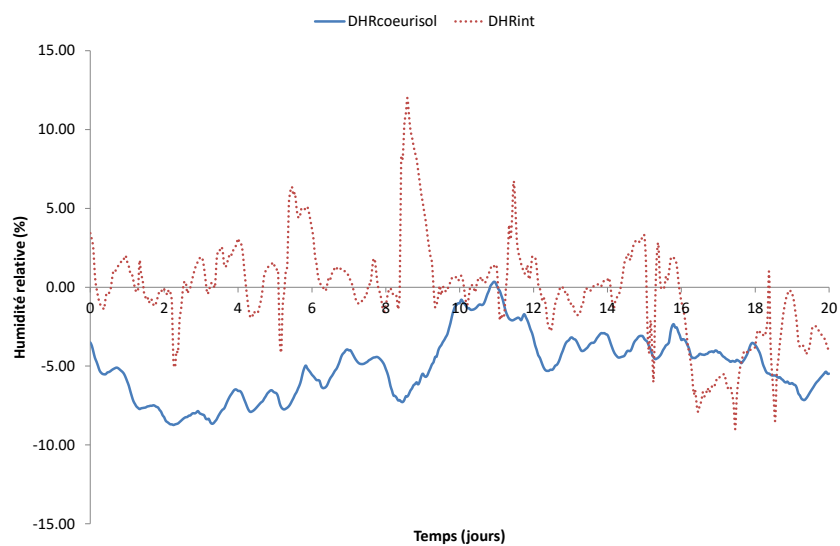


Figure 106 : Évolution des différences humidités relatives critère LM (méthode Levenberg-Marquardt)

3.11.3. Estimation mur avec ITI en combijute printemps 2024.

L'estimation des paramètres a été réalisée sur un fichier d'entrée de données correspondant à vingt jours de mesures du 20 avril au 10 mai 2024 et les résultats sont présentés dans le Tableau 5.

Méthode et init	$\lambda_{s,ref} (\Delta\lambda_{s,ref})$ W/m.K	$\lambda_T (\Delta\lambda_T)$ W/m.K ²	$\lambda_w (\Delta\lambda_w)$ W.Kg/m.K ⁴	$h_e (\Delta h_e)$ W/m ² .K
Trra , init1	0.0413 (0.00240)	0.00055 (7.86e-4)	0.00048 (2.39e-3)	20.00 (3.49e-3)
Trra , init2	0.0388 (0.00026)	0.00010 (9.94e-4)	0.00010 (9.68e-4)	19.99 (1.62e-3)
Lm , init1	0.0376 (0.00049)	0.03113 (3.84e-4)	0.00368 (5.16e-4)	20.13 (9.52e-3)
Lm , init2	0.0380 (0.00078)	0.01288 (4.57e-4)	0.00920 (6.46e-4)	20.00 (1.16e-2)

Tableau 5 : Résultats d'estimation mur avec combijute 20 avril au 10 mai 2024

La Figure 107 et la Figure 108 montrent de bons résidus puisque les différences entre gradients de température et humidité relative extérieur intérieur sont basses. Il y a pratiquement des valeurs de +/- 0.5 °C pour les températures et +/- 8 % pour les humidités relatives.

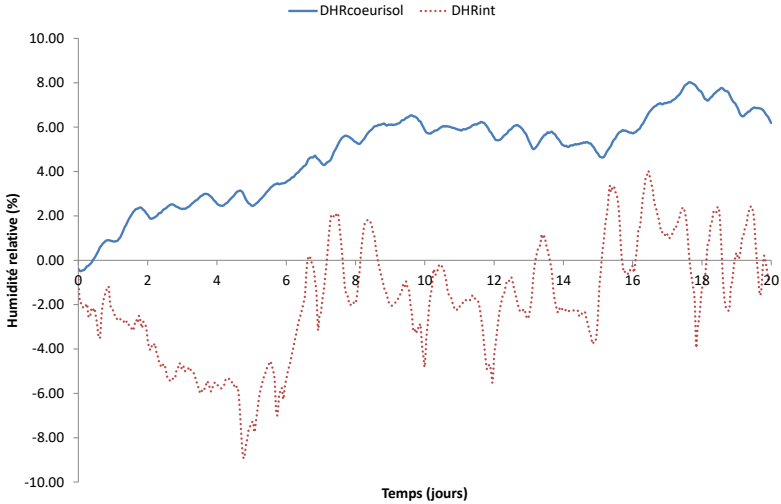


Figure 107 : Évolutions différences humidités relatives mur en combijute 20 jours LM1

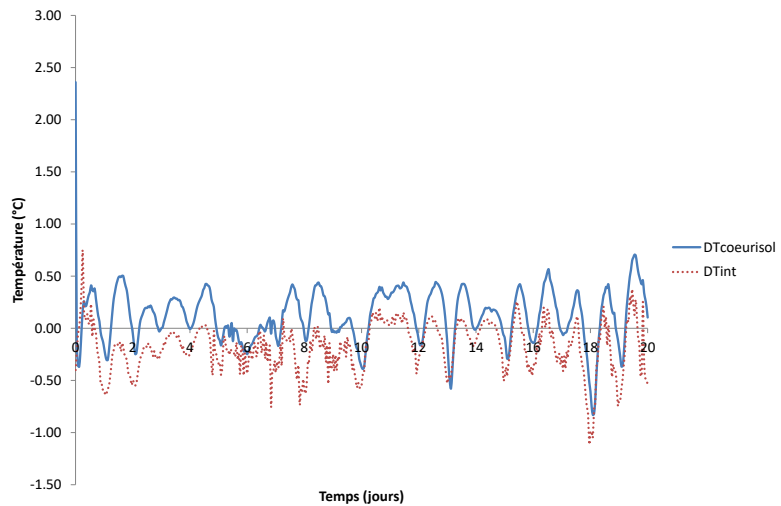


Figure 108 : Évolutions différences températures mur en combijute 20 jours LM1

Les résultats des conductivités thermiques sont satisfaisants. Les paramètres des coefficients de température et d'humidité relative présentent des incertitudes moins bonnes pour l'algorithme à région de confiance. Pour l'algorithme de Levenberg-Marquardt les incertitudes sont meilleures. Les résidus présentés en Figure 107 et Figure 108 sont très satisfaisants. Les écarts de températures sont quasi égaux à +/- 0.5 C ; ceux des humidités relatives d'au maximum 8 %.

3.11.4. Estimation mur avec ITI en terre chanvre hiver 2024

Pour cette étude, la période des mesures du 24 janvier au 23 février 2024 a été choisie. Comme pour le mur en combijute le critère d'estimation est le vecteur des gradients des températures et humidités relatives mesurées et calculées au centre de l'isolant et de la surface intérieure. Le vecteur du critère a été défini en équation (25). La conductivité thermique « sèche » est égale à 0.9 W/m².K, les deux cas suivants d'initialisation du vecteur paramètres d'estimation sont les suivants : $\beta_0 = (0.09, 0.00099, 00099, 20)$ que nous notons init1 et $\beta_0 = (0.09, 0.0001, 0001, 20)$ que nous notons int2.

Méthode et init	$\lambda_{s,ref}(\Delta\lambda_{s,ref})$ W/m.K	$\lambda_T(\Delta\lambda_T)$ W/m.K²	$\lambda_w(\Delta\lambda_w)$ W.Kg/m.K⁴	$h_e(\Delta h_e)$ W/m².K
Trra , init1	0.0899 (2.78e-6)	0.000099 (2.1e-5)	0.000099 (1.26e-5)	20.00 (2.02e-4)
Trra , init2	0.0900 (4.32e-5)	0.000099 (4.2e-5)	0.000099 (5.95e-6)	19.99 (1.61e-4)
Lm , init1	0.0899 (4.87e-6)	0.000099 (6.6e-6)	0.000098 (1.58e-5)	20.00 (4.13e-4)
Lm , init2	0.0899 (7.00e-6)	0.000099 (5.6e-5)	0.000099 (1.00e-5)	20.00 (1.00e-4)

Tableau 6 : Résultats d'estimation mur avec terre chanvre du 24 janvier au 23 février 2024

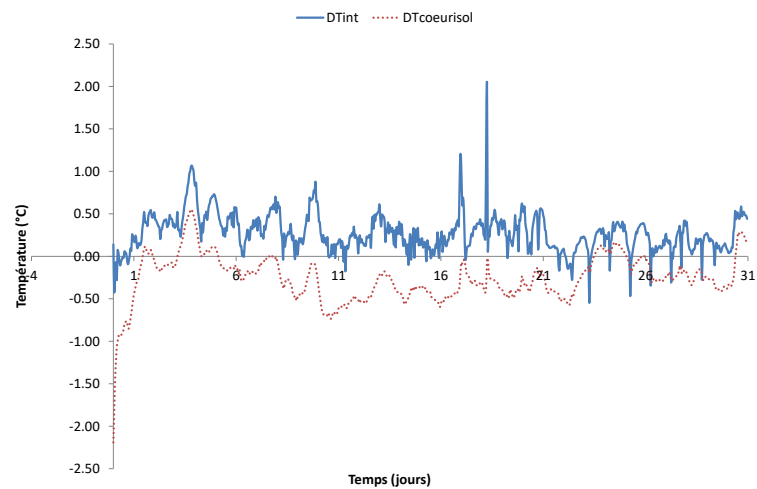


Figure 109 : Évolutions différences températures mur en terre chanvre 30 jours Trra1

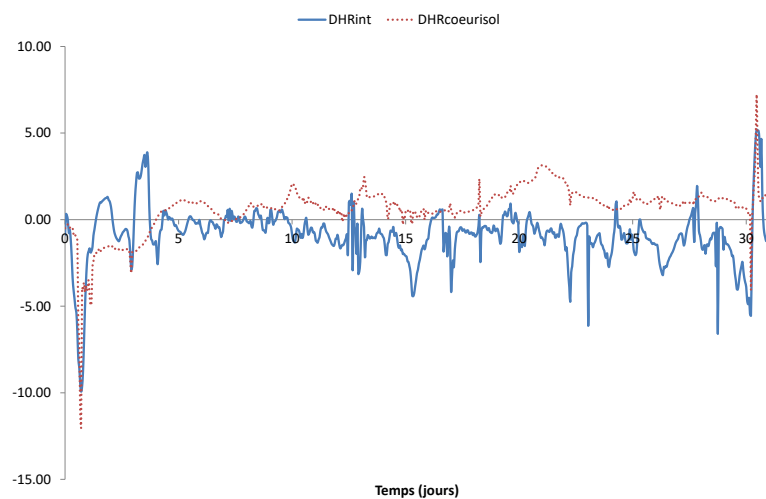


Figure 110 : Évolutions différences humidités relatives mur en terre chanvre 30 jours trra2

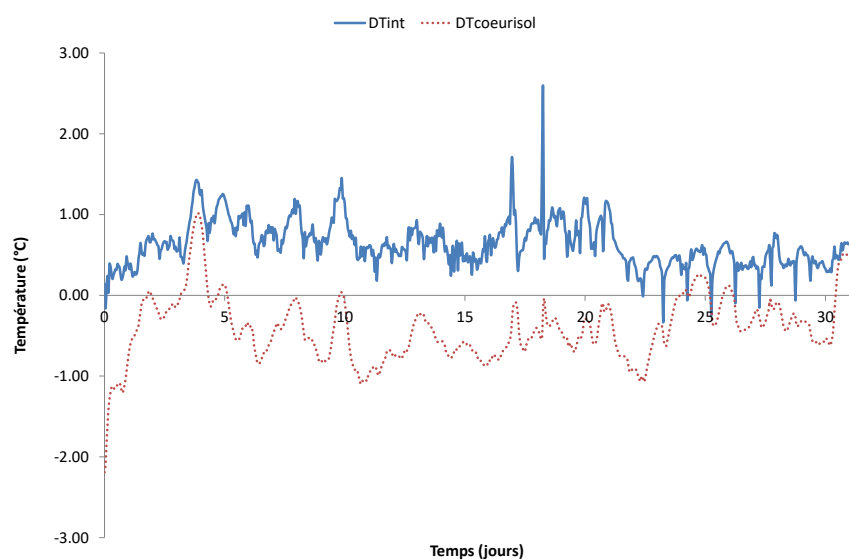


Figure 111 : Évolutions différences températures mur en terre chanvre 30 jours LM1

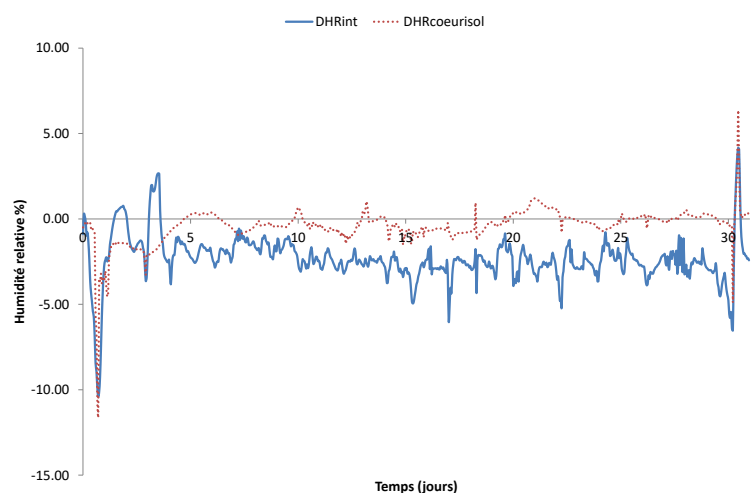


Figure 112 : Évolutions différences des humidités relatives mur en terre chanvre 30 jours LM2

Il est a noté que les résultats d'estimation des paramètres affichés dans le Tableau 6 sont quasiment identiques quel que soit l'algorithme utilisé. Les résidus des températures et humidités relatives (Figure

109 à Figure 112) sont pratiquement identiques. Les humidités relatives donnent un bon accords résultat ; les températures dépassent dans quelques cas les 1 °C. Dans l’ensemble, cette identification des paramètres pour une ITI en terre chanvre durant la période d’hiver 2024 peut être considéré comme satisfaisante.

3.11.5. Estimation mur en terre chanvre printemps 2024

Pour ce mur avec isolation terre chanvre un fichier de mesures du 21 avril au 20 mai 2024 a été sélectionné. Le même critère d’estimation et les mêmes initialisations utilisés pour la période d’hiver sont fixés. Les résultats sont présentés dans le Tableau 7.

Méthode et init	$\lambda_{s,ref}(\Delta\lambda_{s,ref})$ W/m.K	$\lambda_T(\Delta\lambda_T)$ W/m.K ²	$\lambda_w(\Delta\lambda_w)$ W.Kg/m.K ⁴	$h_e(\Delta h_e)$ W/m ² .K
Trra , init1	0.0900 (0.00018)	0.00099 (1.77e-4)	0.00099 (1.56e-4)	19.99 (3.10e-3)
Trra , init2	0.0899 (0.00001)	0.00010 (1.15e-5)	0.00011 (1.68e-5)	19.99 (1.22e-3)
Lm , init1	0.0900 (0.00001)	0.00089 (2.40e-5)	0.00095 (5.39e-6)	20.00 (5.26e-4)
Lm , init2	0.0899 (0.00001)	0.00011 (3.15e-5)	0.00016 (1.25e-5)	20.01 (5.49e-4)

Tableau 7 : Résultats d’estimation mur avec terre chanvre du 21 avril au 20 mai 2024

Une première constatation simple est que l’estimation sur la durée du 21 avril au 20 mai 2024 donne les mêmes résultats pour la conductivité thermique de l’isolant terre chanvre. En revanche, les paramètres λ_T et λ_w sont différents selon l’initialisation choisie. L’initialisation init2 est la même quel que soit l’algorithme utilisé. Si on observe les incertitudes issues des résultats d’estimation l’initialisation init1 pour l’algorithme à région de confiance reste légèrement moins précis. Le détail des calculs et des courbes des résidus sont présentés séparément dans l’Annexe C du rapport. Les résultats sur les différences d’humidité relatives sont améliorés par rapport à ceux de la période d’hiver avec un écart maximum 5 % seulement sont obtenues au lieu des 10 % de la période d’hiver.

Les résidus sont présentés dans la Figure 113 à la Figure 116. Les résultats sur les différences d’humidité relatives sont améliorés par rapport à ceux de la période d’hiver. En effet des différences d’au maximum 5 % sont obtenues au lieu des 10 % de la période d’hiver.

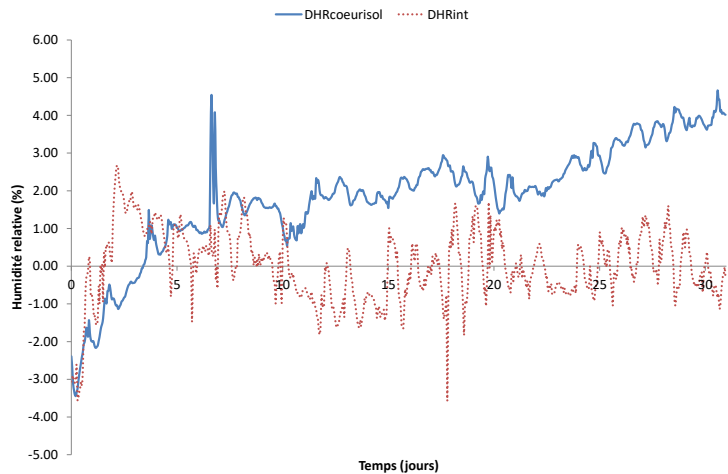


Figure 113 : Évolutions différences humidités relatives mur en terre chanvre 30 jours Trra1

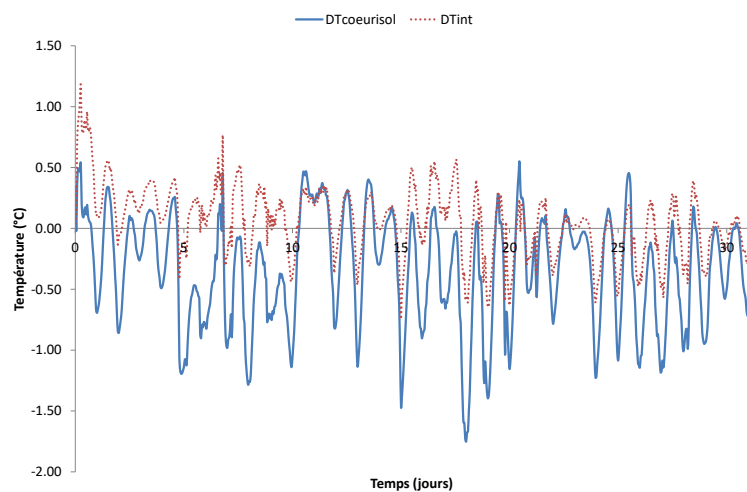


Figure 114 : Évolutions différences températures mur en terre chanvre 30 jours Trra1

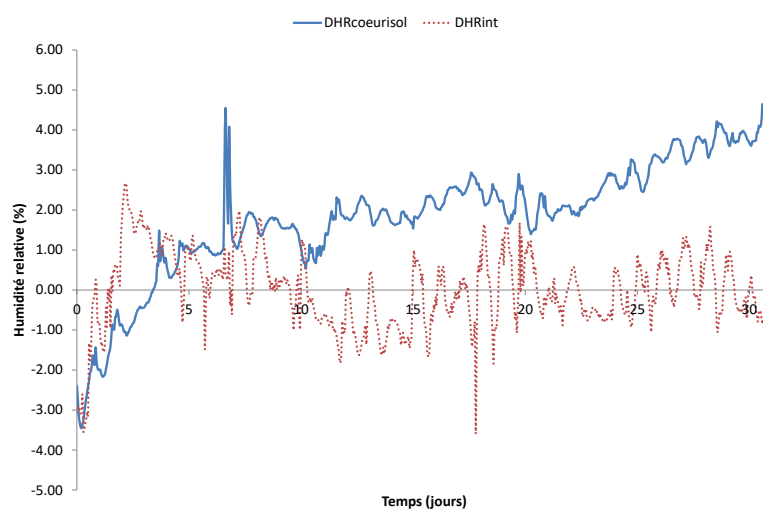


Figure 115 : Évolutions différences humidités relatives mur en terre chanvre 30 jours LM1

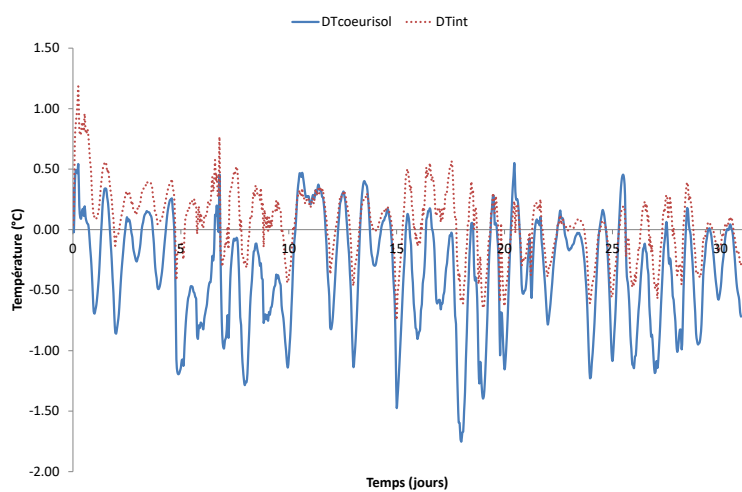


Figure 116 : Évolutions différences températures mur en terre chanvre 30 jours LM1

Pour les températures les différences de températures, le critère température de surface donne de bons résultats avec écarts de ± 0.5 °C. Pour le cœur d'isolant, les amplitudes des écarts varient entre -1.50°C et +0.5 °C mais une majorité d'entre elles se situent à ± 0.5 °C.

Enfin, pour conclure cette partie dédiée à l'estimation du coefficient de transmission surfacique U, les mesures réalisées in situ sur le site de Puiseux-en-Bray ont été exploitées pour estimer les paramètres thermiques à l'aide de la méthode de Levenberg-Marquardt et d'un algorithme à région de confiance, en confrontant les données expérimentales aux résultats du modèle HAM-Tools.

L'application de cette méthode s'est révélée difficile pour certaines périodes, mais des résultats satisfaisants ont pu être obtenus pour d'autres.

En période estivale, les estimations effectuées sur le mur isolé en combijute sont prometteuses, bien que les résidus observés demeurent relativement importants. En revanche, pour les périodes hivernale et printanière, les estimations se sont révélées globalement fiables, avec des résidus jugés acceptables.

Malgré les incertitudes, les critères retenus permettent d'estimer de manière assez précise la conductivité thermique des isolants géo et/ou biosourcés (combijute ou terre-chaux) intégrés dans les murs en torchis, en tenant compte des variations de température et d'humidité relative.

4. Conclusion / Perspectives

L'étude menée dans le cadre du projet ISOLHYBBA a permis d'apporter un éclairage approfondi sur les enjeux et les conditions d'efficacité de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI) des bâtiments anciens à colombages, en particulier lorsqu'elle repose sur des matériaux hygroscopiques et géo ou biosourcés. L'état de l'art révèle que ce type d'isolation, bien que pertinent sur le plan thermique, comporte des risques notables liés à l'accumulation d'humidité dans les parois, pouvant générer des pathologies structurelles. Des principes généraux émergent : nécessité d'un support sain, recours à des matériaux perméables à la vapeur, soin apporté à l'étanchéité à l'air et au vent, et importance d'une ventilation mécanique contrôlée.

Deux visions s'opposent quant à l'approche de la performance thermique : l'une sécuritaire, privilégiant des matériaux hygroscopiques avec des épaisseurs limitées, l'autre plus ambitieuse mais risquée, misant sur une exécution parfaite pour atteindre de hautes résistances thermiques. Les outils de simulation hygrothermique, bien qu'utiles, sont dépendant aux données précises sur les matériaux anciens et les phénomènes complexes aux interfaces.

Dans ce contexte, des essais ont été réalisés en conditions contrôlées au LERMAB sur une paroi issue d'un précédent. Deux types d'isolants biosourcés ont été testés dans le cadre du projet ISOLHYBBA : un mélange fibres de jute/chanvre (combijute) avec finition en Fermacell et de la terre-chanvre avec une finition enduit terre, le premier nécessitant un frein vapeur et le deuxième l'ajout d'un lattage en bois. Ces tests ont permis de recueillir des données rares et précieuses. **Il en ressort que le séchage du terre-chanvre est long (jusqu'à 5 mois)** et que la simulation numérique peut reproduire la dynamique thermique, avec une fidélité relative sur l'humidité (écart de 5 à 10 % d'HR), notamment si certains éléments comme le lattage sont intégrés au modèle. Par ailleurs, les simulations numériques montrent également que la pluie battante est un facteur de risque majeur, soulignant l'importance des protections architecturales (débord de toiture, bardage, végétation). Une réhabilitation soignée, avec un bon niveau d'étanchéité à l'air et une ventilation adaptée, peut permettre une ITI performante, jusqu'à 16 cm d'épaisseur, à condition de l'étudier au cas par cas.

Enfin, une étude in situ sur un mur d'une maison à colombage à de Puiseux-en-Bray a été réalisée par le CERTES de l'UPEC avec les deux mêmes types d'isolants biocourcés testés au laboratoire avec une enceinte bi-climatique laboratoire (i.e. un mélange fibres de jute/chanvre (combijute) avec finition en Fermacell et de la terre-chanvre avec une finition enduit terre) ont confirmé que le **séchage du terre-chanvre est long comparé à la solution combijute**. Toutefois, **l'utilisation d'une ventilation mécanique accélérant le séchage lors de la mise en œuvre par l'artisan en particulier avant la pause de l'enduit en terre est une solution simple et efficace**. La saisonnalité constitue également un facteur déterminant pour optimiser la mise en œuvre de la solution terre-chanvre. Par ailleurs, les tests ont également confirmé l'intérêt d'une estimation dynamique du coefficient de transmission thermique (U), prenant en compte les variations de température et d'humidité. Bien que les méthodes d'ajustement paramétrique aient montré certaines limites selon les périodes de l'année, elles ont permis d'estimer de manière acceptable la conductivité thermique des isolants testés. Il reste néanmoins essentiel d'intégrer une analyse d'incertitudes pour évaluer la robustesse des résultats.

En somme, ce travail souligne la faisabilité d'une réhabilitation thermique performante des murs à pans de bois par l'intérieur en utilisant des matériaux géo et/ou biosourcés, sous réserve d'une approche rigoureuse, expérimentale et numérique combinée.

Les deux solutions étudiées dans cette recherche : la première, constituée d'un rouleau à base d'un mélange de fibres de jute et de chanvre nommé Combijute avec un frein vapeur et finition en Fermacell, et la deuxième, à base de terre-chanvre nécessitant un bardage en lattes et une finition en enduit de terre semblent donner des résultats satisfaisants. Toutefois, il convient de souligner la complexité et la technicité de la mise en place de la deuxième solution, impliquant la construction d'un bardage en lattes de bois, ainsi que le séchage mécanique du terre-chanvre avant l'application de l'enduit en terre.

Enfin, l'ensemble de ce travail a permis de mettre en place avec le partenaire Maisons Paysannes de France un guide de bonnes pratiques à destination des artisans, maîtres d'œuvre et architectes du patrimoine, intégrant des critères de choix des matériaux, des configurations types, et des limites d'usage selon l'exposition et l'état du bâtiment.

Les résultats issus du projet ISOLHYBBA ouvrent des perspectives prometteuses tant sur le plan scientifique qu'opérationnel. À court et moyen terme, l'amélioration des prédictions par simulation apparaît essentielle, notamment en raison des écarts observés entre mesures expérimentales et résultats numériques. Cela souligne l'importance d'enrichir les bases de données hygrothermiques des matériaux géo et/ou biosourcés et des parois anciennes composites, ainsi que de mener une caractérisation approfondie des interfaces critiques telles que bois/torchis ou bois/enduit, afin de perfectionner les modèles existants. Par ailleurs, la poursuite du suivi in situ sur le long terme est une étape cruciale : si les campagnes de mesure actuelles apportent des données précieuses, des observations sur plusieurs années, englobant l'ensemble des cycles saisonniers, permettront d'évaluer plus finement la durabilité et l'évolution des performances des isolants géo et/ou biosourcés dans des conditions réelles. En parallèle, une évaluation environnementale et économique complète, intégrant une analyse du cycle de vie des solutions testées, comparée à celle des matériaux conventionnels, serait un levier important pour appuyer leur intégration dans les politiques publiques de rénovation et de réhabilitation énergétique. Enfin, la méthodologie développée dans le cadre du projet ISOLHYBBA pourrait être étendue à d'autres typologies de bâti ancien comme les maçonneries en pierre, l'adobe ou les constructions en pisé ouvrant ainsi la voie à une approche adaptable et reproductible pour la réhabilitation énergétique du patrimoine architectural, en France comme à l'international.

5. Valorisation – diffusion du projet

Cette partie utilise les différentes publications, communications et actions pour la valorisation du projet ISOLHYBBA

5.1. Organisation d'une Journée Technique dédiée aux bâtiments à colombages, 26 septembre 2024 Épinal

Une journée technique a été organisée en septembre 2024 par le LERMAB sur le thème de la rénovation et de la réhabilitation thermique des maisons à colombage durant laquelle le projet ISOLHYBBA a été mis en valeur par les présentations de plusieurs membres du consortium (M. Larbi Youcef de l'UPEC, M. Degrave société DEGRAVE, M. Alglave Maisons Paysannes de France, M. Mougél du LERMAB). L'événement a attiré une centaine de participants, architectes, bureaux d'études, constructeurs, collectivités territoriales de la Région Grand Est.

Plusieurs annonces ont été faites en amont pour ces journées par différents canaux (Environat Grand-Est, Maisons Paysannes de France, AIENSTIB, Facebook, etc.) et communiqué sur la page de l'actualité de l'ENSTIB.

Lien web :

<https://www.enstib.univ-lorraine.fr/fr/actualite/mission-accomplie-pour-la-journee-technique-dediee-aux-colombages/>

Les présentations des intervenants sont disponibles sur le lien suivant :

<https://compact.univ-lorraine.fr/view/view.php?t=7f14391a5a9b7d9105ba>



5.2. Présentation dans la conférence JITH 2024 : International Days on Thermal Science and Energy, Paris, 29–31 October 2024

Titre : Hygroscopic and bio-based insulation of half-timbered old buildings

Auteurs : Mohamed H. A. LARBI YUCEF ¹, Sara CHEHADE ¹, Abderrahim BOUDENNE ¹, Johann DEGRAVE ²

Affiliation : ¹ CERTES, Université Paris Est Créteil, 61 Avenue du Général De Gaulle, 94010 CRETEL Cedex, France

Affiliation : ² Monsieur Johann DEGRAVE, 60850 Puisieux-en-Bray, France

Abstract: This work presents the preliminary results of the ISOLHYBBA project funded by ADEME agency in France. The aim is to propose a comprehensive method for hygrothermal characterizing half-timbered walls considering their hygroscopic nature. The primary challenge of this work is the implementation of thermo-hydric measurements for walls both in laboratory and in a half-timbered house located in Puiseux-en-Bray, Oise France. Additionally, this work aims to develop a mathematical model that will help to understand the behavior of all the layers of the walls of half-timbered buildings in front of the thermo-hydric loads especially in the hygroscopic and biobased insulation. The experimental measurements of temperatures and relative humidity were compared to a dynamic calculation code (HAM-tools) at different depths of these typical walls with biobased and hygroscopic insulation. The results indicate good agreement between measurements and predicted values, particularly for temperatures despite some uncertainties in relative humidity. This protocol based on measurements and simulations will serve as the basis for a reverse method approach to determine the U-coefficient of the environmental regulation for half-timbered walls. Additionally, the biobased solution used seems to be suitable for old half-timbered buildings.

5.3. Publication d'un guide de recommandations

Un guide consacré à l'utilisation des deux solutions testées d'isolation hygroscopique et biosourcée dans les bâtiments anciens a été publié en accès libre sur le site internet de Maisons Paysannes de France. Ce document formule des recommandations pour leur mise en œuvre, et met également à disposition une base de données sur les propriétés des matériaux employés ainsi que sur les modèles de simulation numérique. Il présente également une comparaison entre les résultats obtenus en laboratoire et in situ sur des parois, avec les calculs numériques réalisés pour l'estimation du coefficient de transmission thermique (U) des murs.

Pour télécharger le guide de recommandation : [Lien](#)

MAISONS
PAYSANNES
DE FRANCE

NOS
ACTIONS

RESTAURER
CONSTRUIRE

PROTECTION
DU PATRIMOINE

REVUE &
LIBRAIRIE

ACTUS

AGENDA

L'étude ISOLHYBBA

Comment optimiser l'isolation des maisons à colombages avec des matériaux naturels tout en préservant leur valeur patrimoniale ?

Télécharger l'étude



« ISOLHYBBA »
Isolation hygroscopique et biosourcée
des bâtiments anciens

Isolation hygroscopique des murs à colombages
par matériaux géo- et biosourcés.
Mesures, modélisation et recommandations

L'objectif du projet ISOLHYBBA était d'étudier de manière rigoureuse le comportement hygrothermique de parois à colombages avec deux types isolants intérieurs, constitués de matériaux hygroscopiques d'origine géo- et biosourcés. Le but a été de mieux comprendre leur performance hygrothermique tout en préservant le patrimoine architectural. La démarche adoptée a été dans un premier temps de mettre en place une base de données des propriétés des matériaux utilisés. Dans un deuxième temps, de développer des modèles de simulation numérique ainsi que de réaliser des mesures en laboratoire et in situ sur des parois pour appréhender leur comportement. Les calculs numériques ont permis d'estimer le coefficient de transmission thermique (U) des murs, tandis que les expérimentations ont servi à comparer les résultats pour les deux solutions testées et à formuler des recommandations pour leur mise en œuvre.

Les maisons anciennes et les économies d'énergie

- CE QU'IL FAUT SAVOIR, ABSOLUMENT
- ATHEBA, AMÉLIORATION THERMIQUE DU BÂTI ANCIEN
- ATHEBA PRO, UNE VERSION DESTINÉE AUX PROFESSIONNELS
- TRAVAUX SCIENTIFIQUES RÉALISÉS PAR LES SERVICES DE L'ÉTAT ET LA PARTICIPATION DE MAISONS PAYSANNES DE FRANCE

▲ HAUT DE PAGE

maisons
paysannes
de france

ASSOCIATION NATIONALE DE SAUVEGARDE DU PATRIMOINE RURAL BATI ET PAYSAGER
RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE

8, passage des deux sœurs
75009 PARIS
Tél. 01 44 83 63 63

HORAIRES D'OUVERTURE AU SIÈGE NATIONAL
Les mercredi après-midi
De 14h00 à 17h00 ou sur rendez-vous



Nous contacter | Presse | Plan du site | Mentions légales




6. Références bibliographiques

- [1] J. BERGER, «l'humidité dans les bâtiments : pathologies et paramètres gouvernants,» *Annales Du bâtiment Et Des Travaux Publics*, 6(01), 2012.
- [2] CoDEM, «Réhabiliter Le Bâti Picard En Pan de Bois,» 2014.
- [3] P. Consultants, «Le Guide ABC - Amélioration Thermique Des Bâtiments Collectifs Construits de 1850 à 1974,» 2011.
- [4] E. T. CETE Est, LMDC et M. P. d. France, «HYGROBA : Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes ; France entière,» 2013.
- [5] SCOP-ENERTECH, «Migration d'humidité et de Vapeur d'eau Dans Les Parois Du Bâti Ancien,» 2021.
- [6] H. Kuenzel et A. Holm, «Moisture Control and Problem Analysis of Heritage Constructions,» p. 2009.
- [7] DIN 4108-3, «Protection thermique et économie d'énergie dans les bâtiments - Partie 3 : Protection contre l'humidité soumise aux conditions climatiques - Exigences, méthodes de calcul et orientations pour la planification et la construction,» 2018.
- [8] WTA, «Merkblatt 8-5 - 2018-04 - Restoration of Historical Half-Timbered Buildings According to WTA V : Internal Thermal Insulation Systems,» 2018.
- [9] «Journée technique JT24-Epinal Renovation Thermique Et Gestion De L'humidité Dans Les Maisons À Colombages (<https://compact.univ-lorraine.fr/view/view.php?t=7f14391a5a9b7d9105ba>)».
- [10] S. K. Angela, W. Peter, R. N. Toke, P. Ruut, H. Carl-Eric et R. Carsten, «The International Building Physics Toolbox in Simulink,» *Energy and Buildings*, vol. 39, n° 16, pp. 665-674, 2007.
- [11] A. S. Kalagasidis, «HAM Tools, An integrated simulation tool for heat, air and moisture transfer analyses in building physics, PHD thesis, Chalmers institute of technology,» Gotenburg, Sweden, 2004..
- [12] «Projet BAUCH Rapport final,» Convention N° 1704C0038 ADEME, 2020.
- [13] M. S. a. M. S. packages, «www.mathworks.com,» [En ligne].
- [14] H. Hens, «Final Report, Vol. 1 Task 1 Modelling. International Energy Agency Annex 24 Heat Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (HAMTIE),» Departement Burgerlijke Bouwku , Katholieke Universiteit Leuven Belgium, 1996.
- [15] S. R., «Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit,» *Beiheft VDI-Zeitschrift, Verfahrenstechnik*, vol. 6, pp. 170-177, 1938.
- [16] H. C.E., «HAMSTAD WP2 Modelling Version 4 Report R-02 :9,» Department of building physics, Chalmers University of Technology, Gothenburg Sweden, 2002.
- [17] P. A., «Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques réelles et modélisation numérique,» Thèse INSA de Lyon, 2009.
- [18] K. M.K., «Heat, Air and Moisture transfer through new and retrofitted insulated envelop parts,» Task 3 Material properties IEA Annex 24, 1996.
- [19] M. K. Kumaran, «A thermal and moisture transport property database for common building and insulating materials,» ASHRAE Research project 1018-RP, 2002.
- [20] H. H., Building physics Heat air and moisture, Berlin Deutschland ISBN 978-3-433-01841-5 : Ernst & Sohn, 2007.

- [21] S. A.W.M. et D. W. M.H., «Advanced simulation of building systems and control with Simulink,» chez *8th IBPSA conference*, Eindhoven Netherlands, 2003.
- [22] R. Helisoa, R. Romain et M. Eric, «Dataset for validating 1-D heat and mass transfer models within building walls with hygroscopic materials,» *Building and Environment*, vol. 89, 2015.
- [23] H. MSR145 : Data Logger for Temperature. [En ligne]. Available : <https://www.msr.ch/en/product/datalogger-temperature-humidity-pressure-acceleration-msr145/>.
- [24] A. Tarek, A. Boudjemaa, B. Abderrahim et B. Karim, «Sensitivity analysis of transient heat and moisture transfer in a bio-based date palm concrete wall,» *Building and Environment*, vol. 202, p. 108019, 2021.
- [25] W. Marquardt D, «An algorithm for the least square estimation of nonlinear parameters,» *SIAM Journal*, vol. 1, pp. 431-441, 1963.
- [26] A. R. Conn, N. I. M. Gould et Toint. Ph. L, «Trust Region Methods,» *MOS-SIAM Series on Optimization*, Philadelphia, 2000.
- [27] K. A. Sasic, «HAM Tools, An integrated simulation tool for heat, air and moisture transfer analyses in building physics,» PHD thesis, Chalmers institute of technology,, Gotenburg, Sweden, 2004..

Index des tableaux et figures

TABLEAUX

Tableau 1 : Répartition et organisation des lots	15
Tableau 3 : Caractéristiques thermophysiques des matériaux utilisés.	27
Tableau 4 : Synthèse des propriétés hygrothermiques des matériaux des parois étudiées.....	29
Tableau 5 : variables et données de l'outil « Construction ».....	45
Tableau 6 : Résultats d'estimation Puiseux en Bray 20 jours été 2023	81
Tableau 7 : Résultats d'estimation mur avec combijute 20 avril au 10 mai 2024.....	84
Tableau 8 : Résultats d'estimation mur avec terre chanvre du 24 janvier au 23 février 2024.....	85
Tableau 9 : Résultats d'estimation mur avec terre chanvre du 21 avril au 20 mai 2024.....	87

FIGURES

Figure 1 : Mesure thermographique au siège de Maisons Paysannes de l'Oise.....	12
Figure 2 : Enceinte Bi-Climatique, LERMAB Campus Bois ENSTIB Epinal.....	12
Figure 3 : Synopsis d'organisation du projet ISOLHYBBA	15
Figure 4 : Evolution des techniques constructives (Maisons Paysannes, Fiche ATHEBA).....	16
Figure 5 : Etiquette DPE (Effy).....	17
Figure 6 : Pathologies fréquentes sur les constructions à pans de bois (CoDEM, 2014) [2]	19
Figure 7 : Solution ATHEBA pour la réhabilitation du bâti ancien	19
Figure 8 : Solutions CoDEM pour la réhabilitation thermique des murs à pas de bois (Guide Codem,2014) [2]	20
Figure 9 : Tableau synthèse résultat de l'étude HYGROBA sur les pans de bois	22
Figure 10 : Pénétration de l'eau de pluie et potentiel de séchage par diffusion de vapeur à l'extérieur comme à l'intérieur d'un mur à pans de bois [6].....	23
Figure 11 : Dispositif de mesure Hot Disk (CERTES).....	25
Figure 12 : Dispositif Isomet (CERTES).....	25
Figure 13 : Dispositif Hot Disk pour la mesure des propriétés thermophysiques de terre-chanvre (LERMAB)	26
Figure 14 : Dispositif DVS pro Humid.....	26
Figure 15 : Carrousel du DVS avec des échantillons.....	26
Figure 16 : Gravitest et son carrousel, et coupelle contenant une solution saline sur laquelle est scellé l'échantillon	27
Figure 17 : Courbes de sorption et désorption du Fermacell, combijute, terre chanvre et torchis	29
Figure 18 : Etats de réalisation du mur à colombage (LERMAB).....	30
Figure 19 : Structure de la paroi globale.....	30
Figure 20 : Dénomination des 4 zones d'études	31
Figure 21 : Disposition capteurs structures apparentes	31
Figure 22 : Disposition capteurs structures semi-apparente	31
Figure 23 : Mise en œuvre de l'isolation en laine de jute, avec ajout du pare-vapeur Intello (ProClima) et de plaques de Fermacell	32
Figure 24 : Mise en œuvre de l'isolation terre/chanvre, avec l'ajout d'un lattage pour le support de l'enduit intérieur.....	32
Figure 25 : Evolution de l'HR (a), la température (b) au niveau de la surface (sonde 1-rouge), et de part et d'autre de la couche de terre-chanvre (sonde 2-orange coté intérieur) et sonde 5 -vert fluo coté extérieur) de la paroi avec torchis classique.....	33
Figure 26 : Utilisation du modèle WUFI pour modéliser le séchage du terre-chanvre au niveau de la jonction isolant-torchis pour trois scénarios de pose.	34
Figure 27 : Numérotation des sondes dans l'épaisseur de la paroi en correspondance aux courbes des figures ci-après. Leur position est respectivement pour P1, P2, ..., P6, à 0, 20, 50, 80, 130, 150 mm par rapport à la surface de l'enduit extérieur	35
Figure 28 : Évolution de la température mur nu, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5..	35
Figure 29 : Zoom sur l'évolution de la température mur nu, en régime dynamique, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5.....	36

Figure 30 : Evolution de l'humidité relative, mur nu, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5	37
Figure 31 : Numérotation des sondes dans l'épaisseur de la paroi en correspondance aux courbes des figures ci-après. La position respective des sondes par rapport à la surface de l'enduit extérieur est pour P6, P7, P8, P9, P10, 150, 200, 270, 300, 329mm	37
Figure 32 : Evolution de la température, mur isolé, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	38
Figure 33 : Zoom sur l'évolution de la température, mur isolé, en régime dynamique, zone 1, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	39
Figure 34 : Evolution de l'humidité relative, mur isolé, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	40
Figure 35 : Zoom sur l'évolution de l'humidité relative, mur isolé, en régime dynamique, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	41
Figure 36 : Simulation avec WUFI pour l'évaluation de l'impact d'isolant d'une paroi avec orientation nord	43
Figure 37 : Simulation avec WUFI pour évaluer l'impact de l'absorption d'eau de pluie dans le cas d'orientation Sud-Ouest (pluie battante)	43
Figure 38 : Systèmes et sous-systèmes du HAM tool	45
Figure 39 : Principaux blocs HAM-tools sous simulink Matlab	46
Figure 40 : Blocks constructions	46
Figure 41 : Block Helpers	46
Figure 42 : Forme générale d'une courbe de sorption	48
Figure 43 : Schéma d'un du maillage en partie courante	49
Figure 44 : Maillage d'un mur dans HAM-Tools	49
Figure 45 : Cas d'étude sous Simulink Matlab	50
Figure 46 : Schéma HAM tools mur à colombage avec isolation en fibres de bois et frein vapeur	51
Figure 47 : Modélisation des transferts thermiques et hydriques dans HAM-tools	51
Figure 48 : Températures extérieures (Text) et intérieures (Tairint) enceinte biclimatique LERMAB	52
Figure 49 : Humidités extérieures (HRExt) et intérieures (Hairint) enceinte biclimatique LERMAB	52
Figure 50 : Etude de l'effet de la pose d'un frein vapeur	52
Figure 51 : Evolution humidité relative couche avant frein vapeur (enduit intérieur)	53
Figure 52 : Evolution humidité relative couche après frein vapeur (isolant fibre bois)	53
Figure 53 : Evolution humidité relative milieu isolant fibre bois	53
Figure 54 : Position des sondes dans les couches ajoutées (ITI en fibres de jute et de chanvre - Combijute)	54
Figure 55 : Températures mesurées et calculées surface extérieure du mur avec isolation en combijute	54
Figure 56 : Températures milieu combijute calculées et mesurées	55
Figure 57 : Températures surface intérieure calculées et mesurées	55
Figure 58 : Humidités relatives calculées et mesurées pour la surface extérieure	55
Figure 59 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du combijute	56
Figure 60 : Humidités relatives calculées et mesurées à la surface intérieure du mur avec combijute	56
Figure 61 : Position des sondes dans les couches ajoutées (ITI en terre chanvre)	56
Figure 62 : Températures mesurées et calculées mur avec terre chanvre	57
Figure 63 : Températures calculées et mesurées au milieu du torchis	57
Figure 64 : températures mesurées et calculées au milieu du terre chanvre	57
Figure 65 : Températures calculées et mesurées à la surface intérieure du mur avec terre chanvre	58
Figure 66 : Humidités relatives calculées et mesurées surface extérieure du mur avec terre chanvre	58
Figure 67 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du torchis	58
Figure 68 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du terre chanvre	59
Figure 69 : Humidités relatives mesurées et calculées à la surface intérieure du mur en terre chanvre	59
Figure 70 : Bâtiment démonstrateur à Puiseux-en-Bray dans l'Oise pour le test des solutions ITI terre chanvre et combijute	60
Figure 71 : Installation de l'ITI terre chanvre avec latte en bois et finition en enduit de terre	60
Figure 72 : Installation de l'ITI combijute avec frein vapeur et finition en fermacell	60
Figure 73 : Isolation de mur en torchis avec le combijute et position des capteurs de température et humidité	61

Figure 74 : Isolation de mur en torchis avec la terre chanvre et position des capteurs de température et humidité.....	61
Figure 75 : Installation d'un pyranomètre et de l'abri météorologique pour le capteur T & HR (image à gauche) et d'un Data logger MSR avec sondes (image à droite)	61
Figure 76 : Protocole expérimental et acquisition de données pour les deux types d'isolation	62
Figure 77 : Thermogramme surface extérieure du mur en colombages à Puiseux en Bray.....	62
Figure 78 : Thermogramme surface intérieur de l'ITI chanvre terre avec finition enduit terre.....	63
Figure 79 : Thermogramme surface intérieur de l'ITI combijute avec finition fermacell	63
Figure 80 : Température intérieure et extérieur de l'air	64
Figure 81 : Humidité relative intérieure et extérieure de l'air	64
Figure 82 : Evolution du rayonnement global reçu par le mur extérieur orienté ouest	65
Figure 83 : Evolution des températures et humidités relatives dans les différentes couches du mur avec combijute.....	65
Figure 84 : Evolution de l'humidité relative terre chanvre	66
Figure 85 : Evolution de la température mur en terre chanvre (octobre à janvier).....	66
Figure 86 : Evolution de l'humidité relative mur en terre chanvre (octobre à janvier)	66
Figure 87 : Evolution de la températures mur en combijute (octobre à janvier).....	67
Figure 88 : Evolution de l' humidité relative mur en combijute (octobre à janvier).....	67
Figure 89 : Evolution de l'humidité relative mur avec terre chanvre (janvier à juillet)	67
Figure 90 : Evolution de la température mur avec terre chanvre (janvier à juillet)	68
Figure 91 : Evolution de l'humidité relative mur avec combijute (janvier à juillet)	68
Figure 92 : Evolution de l'températures mur avec combijute (janvier à juillet).....	68
Figure 93 : Variation de la température au milieu de la couche de torchis	70
Figure 94 : variation : de l'humidité relative au milieu de la couche de torchis	70
Figure 95 : Evolution de la température au milieu de l'isolant en combijute.....	71
Figure 96 : Evolution de l'humidité relative au milieu de l'isolant en combijute	71
Figure 97 : Variation de la température sur la surface du Fermacell.....	71
Figure 98 : Variation de l'humidité relative sur la surface du Fermacell	72
Figure 99 : Température calculées et mesurées à l'interface du terre chanvre et du torchis	72
Figure 100 : Températures calculées et mesurées au milieu du terre chanvre	73
Figure 101 : Températures calculées et mesurées à la surface de l'enduit terre.....	73
Figure 102 : Humidités relatives calculées et mesurées à l'interface terre chanvre torchis.....	73
Figure 103 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du terre chanvre	74
Figure 104 : Humidités relatives calculées et mesurées à la surface de l'enduit terre	74
Figure 105 : Températures mesurées et calculées à l'interface torchis terre chanvre.....	74
Figure 106 : Températures mesurées et calculées milieu du terre chanvre.....	75
Figure 107 : Températures calculées et mesurées à la surface de l'enduit terre	75
Figure 108 : Humidités relatives calculées et mesurées à l'interface torchis terre chanvre.....	75
Figure 109 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du terre chanvre	76
Figure 110 : Humidités relatives calculées et mesurées à la surface de l'enduit terre.....	76
Figure 111 : Températures calculées et mesurées au milieu du torchis.....	76
Figure 112 : Températures calculées et mesurées au milieu du combijute	77
Figure 113 : Températures calculées et mesurées au niveau du frein vapeur	77
Figure 114 : Températures calculées et mesurées à la surface du Fermacell.....	77
Figure 115 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du torchis	78
Figure 116 : Humidités relatives calculées et mesurées au milieu du combijute	78
Figure 117 : Humidités relatives calculées et mesurées au niveau du frein vapeur	78
Figure 118 : Humidités relatives calculées et mesurées à la surface du Fermacell	79
Figure 119 : Evolution des différences de températures critère trra1.....	81
Figure 120 : Evolution des différences humidités relatives critère trra1	82
Figure 121 : Evolution des différences de températures critère méthode Levengerg-Marquardt	82
Figure 122 : Evolution des différences humidités relatives critère LM (méthode Levengerg-Marquardt) ..	83
Figure 123 : Evolutions différences humidités relatives mur en combijute 20 jours LM1	84
Figure 124 : Evolutions différences températures mur en combijute 20 jours LM1.....	84
Figure 125 : Evolutions différences températures mur en terre chanvre 30 jours Trra1.....	85
Figure 126 : Evolutions différences humidités relatives mur en terre chanvre 30 jours trra2	86
Figure 127 : Evolutions différences températures mur en terre chanvre 30 jours LM1.....	86

Figure 128 : Evolutions différences des humidités relatives mur en terre chanvre 30 jours LM2	86
Figure 129 : Evolutions différences humidités relatives mur en terre chanvre 30 jours Trra1.....	87
Figure 130 : Evolutions différences températures mur en terre chanvre 30 jours Trra1.....	88
Figure 131 : Evolutions différences humidités relatives mur en terre chanvre 30 jours LM1	88
Figure 132 : Evolutions différences températures mur en terre chanvre 30 jours LM1.....	88
Figure 1 (Annexe A) : Numérotation des sondes dans l'épaisseur de la paroi en correspondance aux courbes des figures ci-après. La position respective des sondes par rapport à la surface de l'enduit extérieur est pour P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, 0,20, 50, 90 ,130, 150, 260, 320, 320, 333mm. ..	102
Figure 2 (Annexe B) : Evolution de la température, mur isolé, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	103
Figure 3 (Annexe A) : Zoom sur l'évolution de la température, mur isolé, en régime dynamique, zone 1, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	104
Figure 4 (Annexe A) : Evolution de l'humidité relative, mur isolé, zone 3, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9.....	105
Figure 5 (Annexe A) : Zoom sur l'évolution de l'humidité relative, mur isolé, en régime dynamique, zone 3, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	106
Figure 1 (Annexe B) : Evolution de la température mur nu, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5.....	107
Figure 2 (Annexe B) : Evolution de l'humidité relative, mur nu, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5.....	108
Figure 3 (Annexe B) : Evolution de la température mur nu, en régime dynamique, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5	109
Figure 4 (Annexe B) : Evolution de la température, mur isolé, zone 1, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	110
Figure 5 (Annexe B) : Zoom sur l'évolution de la température, mur isolé, en régime dynamique, zone 1, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	111
Figure 6 (Annexe B) : Evolution de l'humidité relative, mur isolé laine de bois, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	112
Figure 7 (Annexe B) : Evolution de l'humidité relative, mur isolé laine de bois, en régime dynamique, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9	113
Figure 1 (Annexe C) : Conductivité thermique combijute été 2023.....	114
Figure 2 (Annexe C) : U mesuré mur avec combijute été 2023.....	115
Figure 3 (Annexe C) : conductivité thermique combijute printemps 2024.	115
Figure 4 (Annexe C) : U mesuré mur avec combijute printemps 2024	116
Figure 5 (Annexe C) : conductivité thermique terre chanvre printemps 2024.....	116
Figure 6 (Annexe C) : U mesuré mur avec terre chanvre printemps 2024.....	117
Figure 7 (Annexe C) : conductivité thermique terre chanvre hiver 2024.	117
Figure 8 (Annexe C) : U mesuré mur avec terre chanvre hiver 2024	118

Sigles et acronymes

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

LERMAB : Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois, campus bois d'Épinal

CERTES : Centre d'études et de recherche en thermique, environnement et systèmes, Université Paris Est Créteil

MPF : Maisons Paysannes de France

Nomenclature

Symboles latins

Symbole	Nom	unité
Cp	chaleur spécifique	J kg ⁻¹ K ⁻¹
w	Taux d'humidité	kg m ⁻³
T	température	K
P _v	pression partielle	Pa
s	Pression capillaire	Pa
h _e	Chaleur latente	J kg ⁻¹

Symboles grecs

Symbole	Nom	unité
λ	conductivité thermique	W m ⁻¹ K ⁻¹
ρ	densité	kg m ⁻³
δ_p	perméabilité à la vapeur	kgm ⁻¹ s ⁻¹ Pa ⁻¹

Indices

Symbole	Nom
air	Air
i	nœud du maillage

Annexe A

Comportement hygrothermique du mur torchis standard isolé (zone 4 – isolant combijute)

A Comportement hygrothermique du mur torchis standard isolé (zone 4 – isolant combijute)

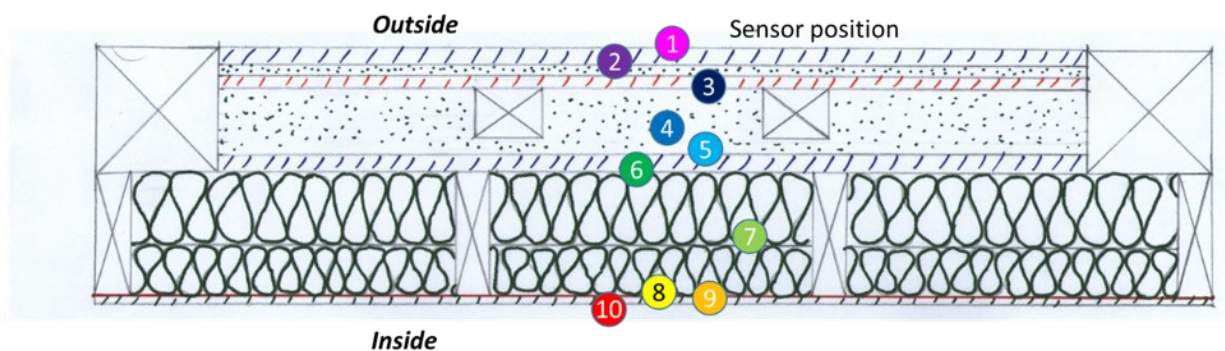


Figure 1 (Annexe A) : Numérotation des sondes dans l'épaisseur de la paroi en correspondance aux courbes des figures ci-après. La position respective des sondes par rapport à la surface de l'enduit extérieur est pour P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, 0, 20, 50, 90, 130, 150, 260, 320, 320, 333mm.

A-1 température au sein du mur isolé en combijute

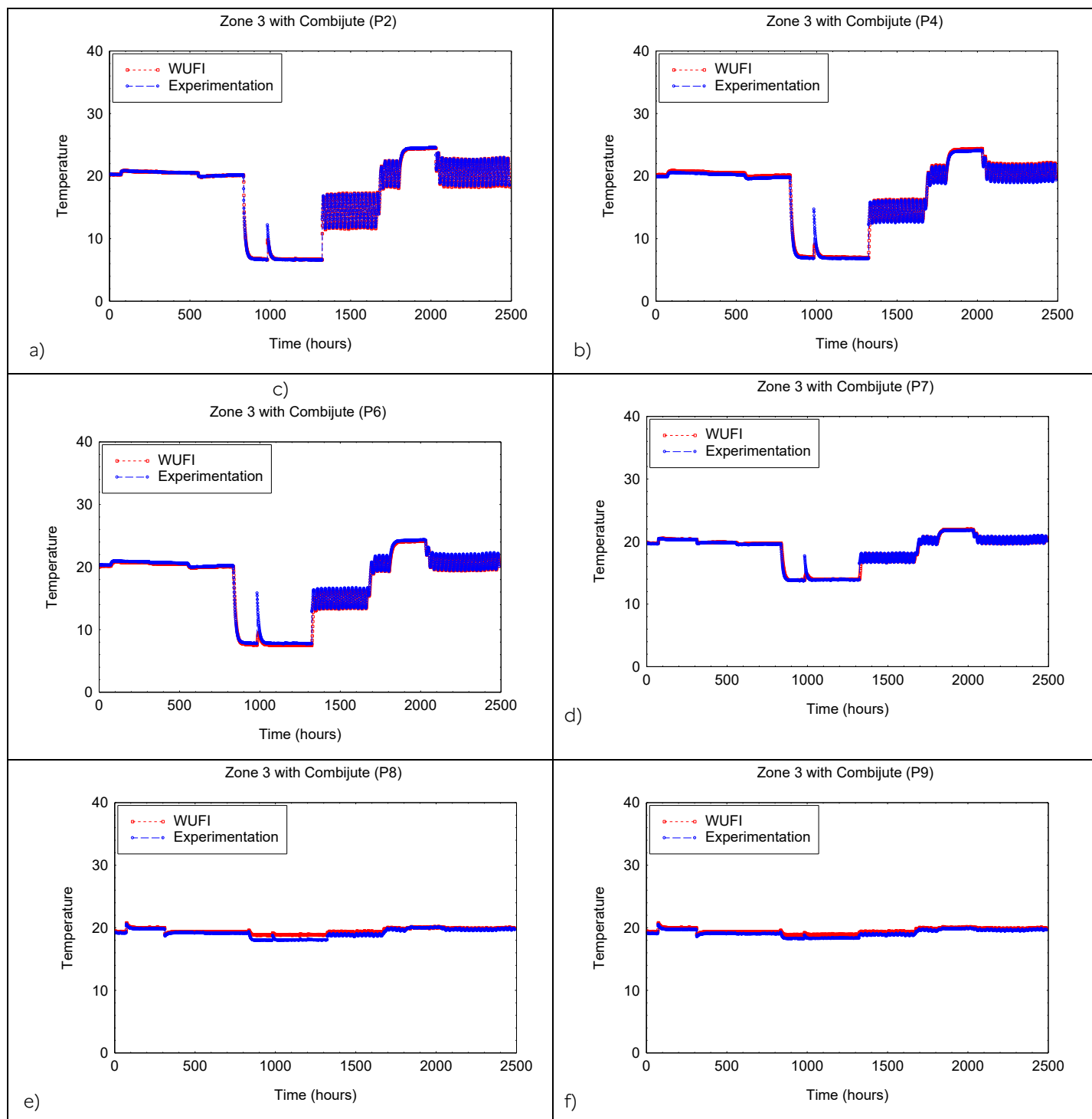


Figure 2 (Annexe B) : Évolution de la température, mur isolé, zone 4, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

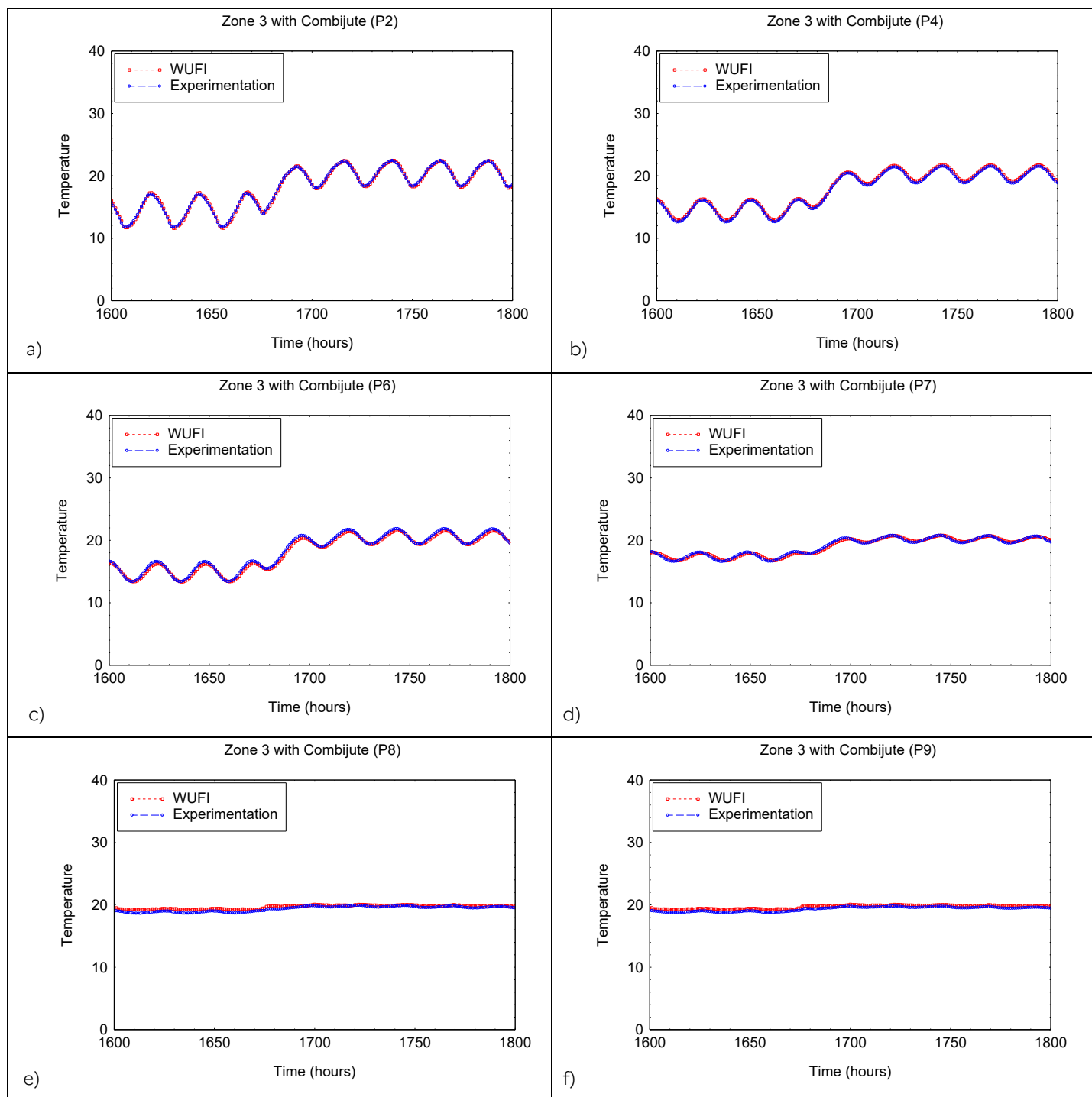


Figure 3 (Annexe A) : Zoom sur l'évolution de la température, mur isolé, en régime dynamique, zone 1, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

A-2 Humidité au sein du mur isolé en combijute

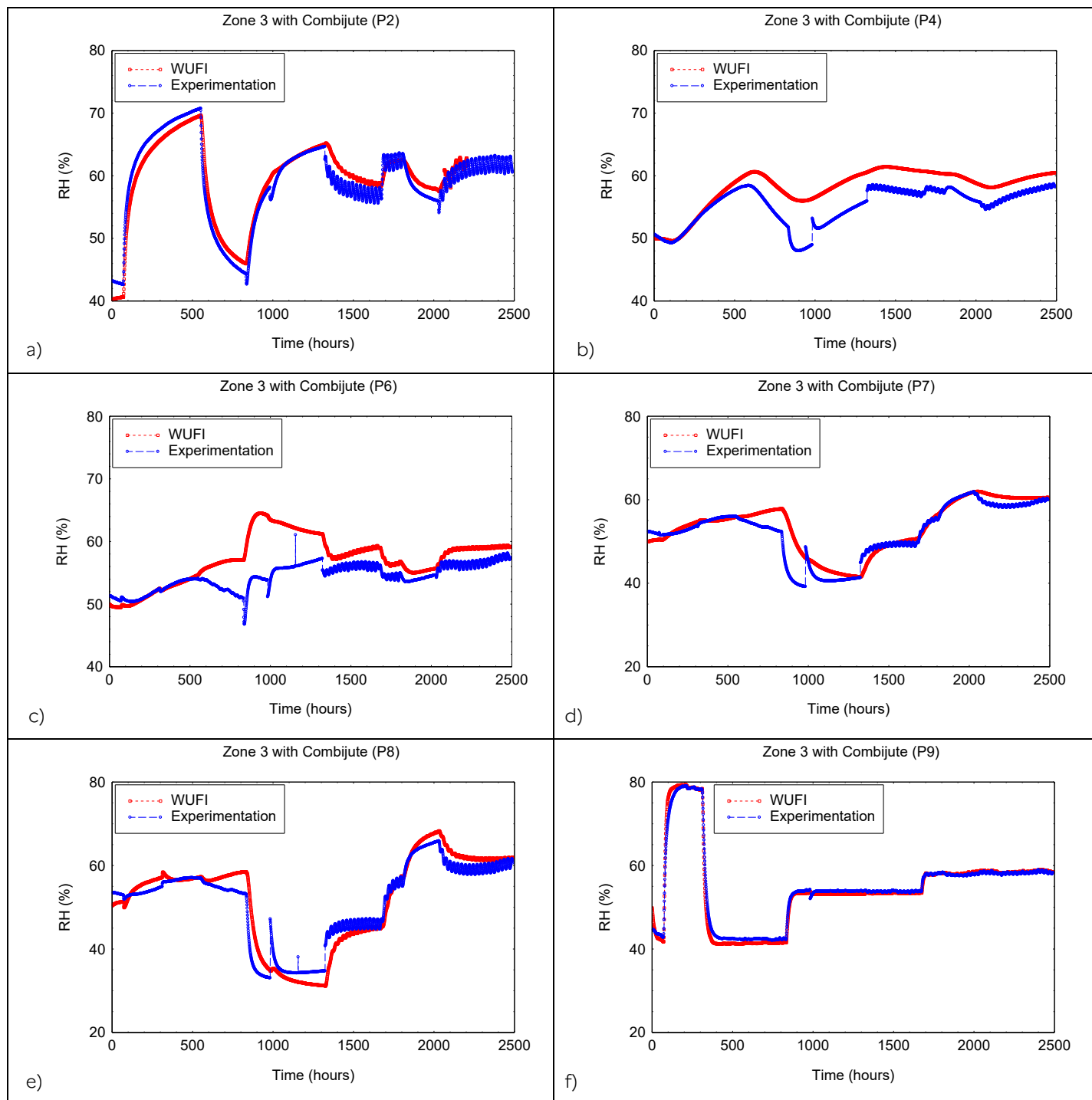


Figure 4 (Annexe A) : Évolution de l'humidité relative, mur isolé, zone 3, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

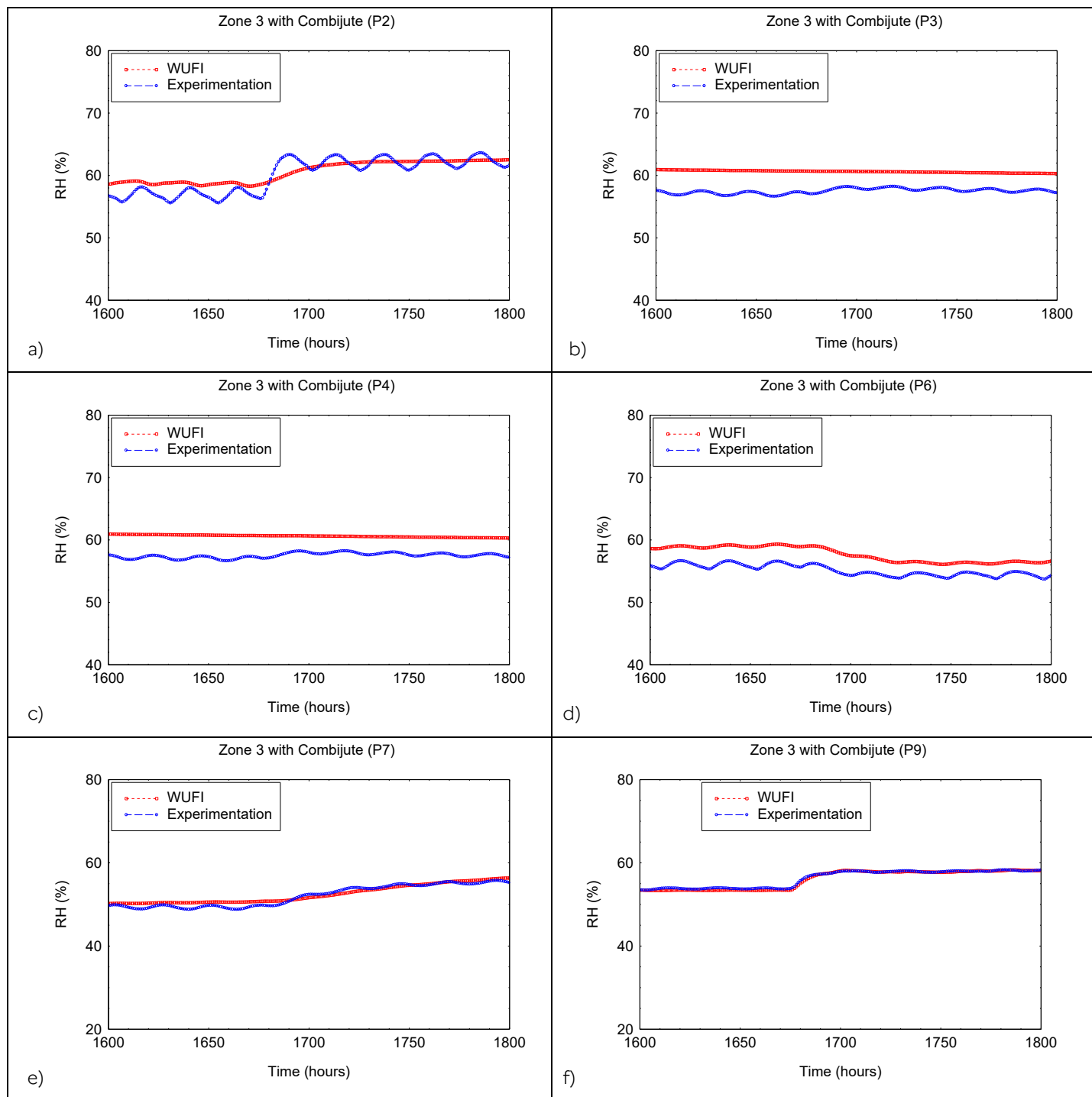


Figure 5 (Annexe A) : Zoom sur l'évolution de l'humidité relative, mur isolé, en régime dynamique, zone 3, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

Annexe B

Analyse des données sur le mur nu (Torchis allégé)

B Analyse des données sur le mur nu (Torchis allégé)

B-1 Analyse de la température en différents points selon l'épaisseur

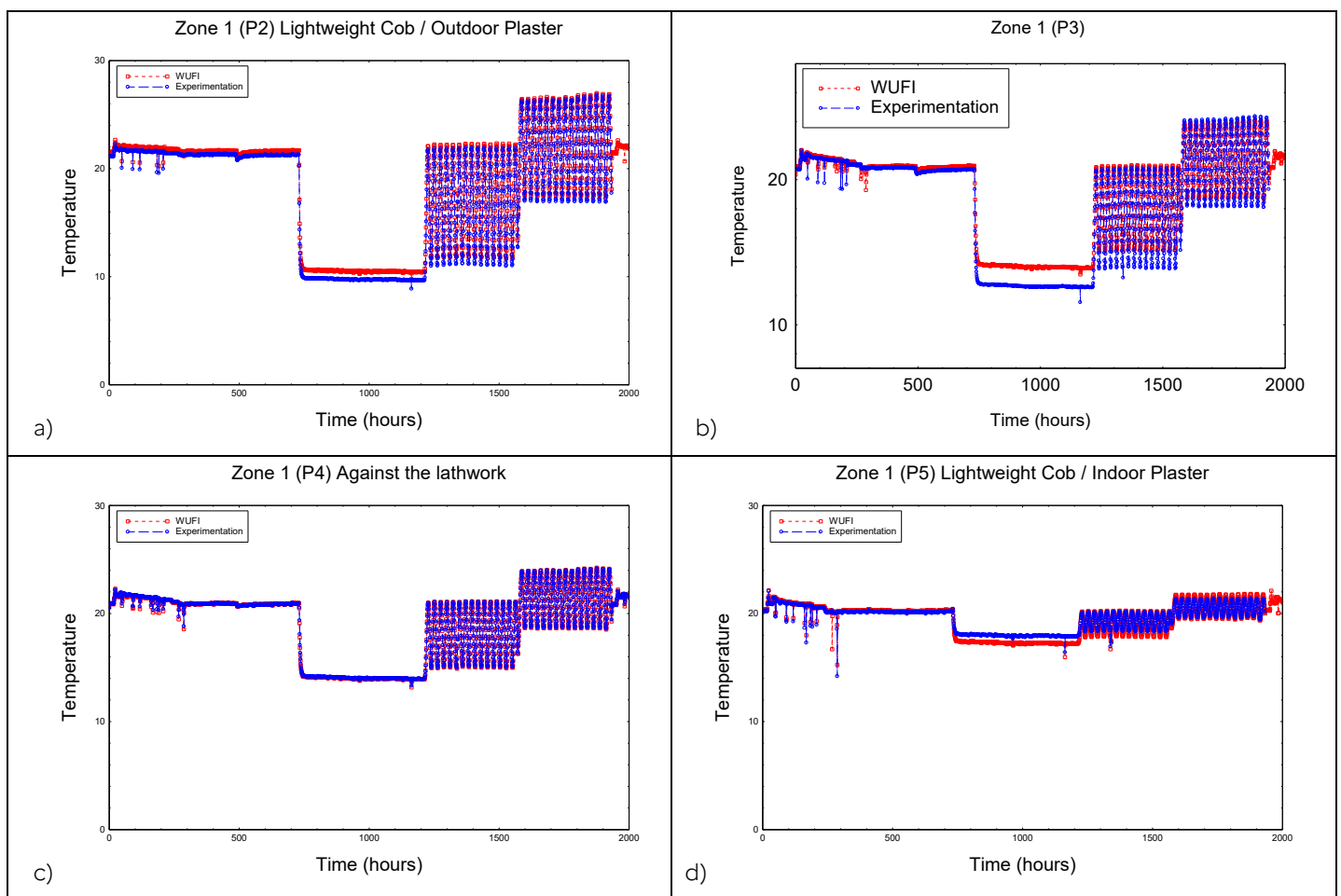


Figure 1 (Annexe B) : Évolution de la température mur nu, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5

B-2 Analyse l'HR en différents points selon l'épaisseur

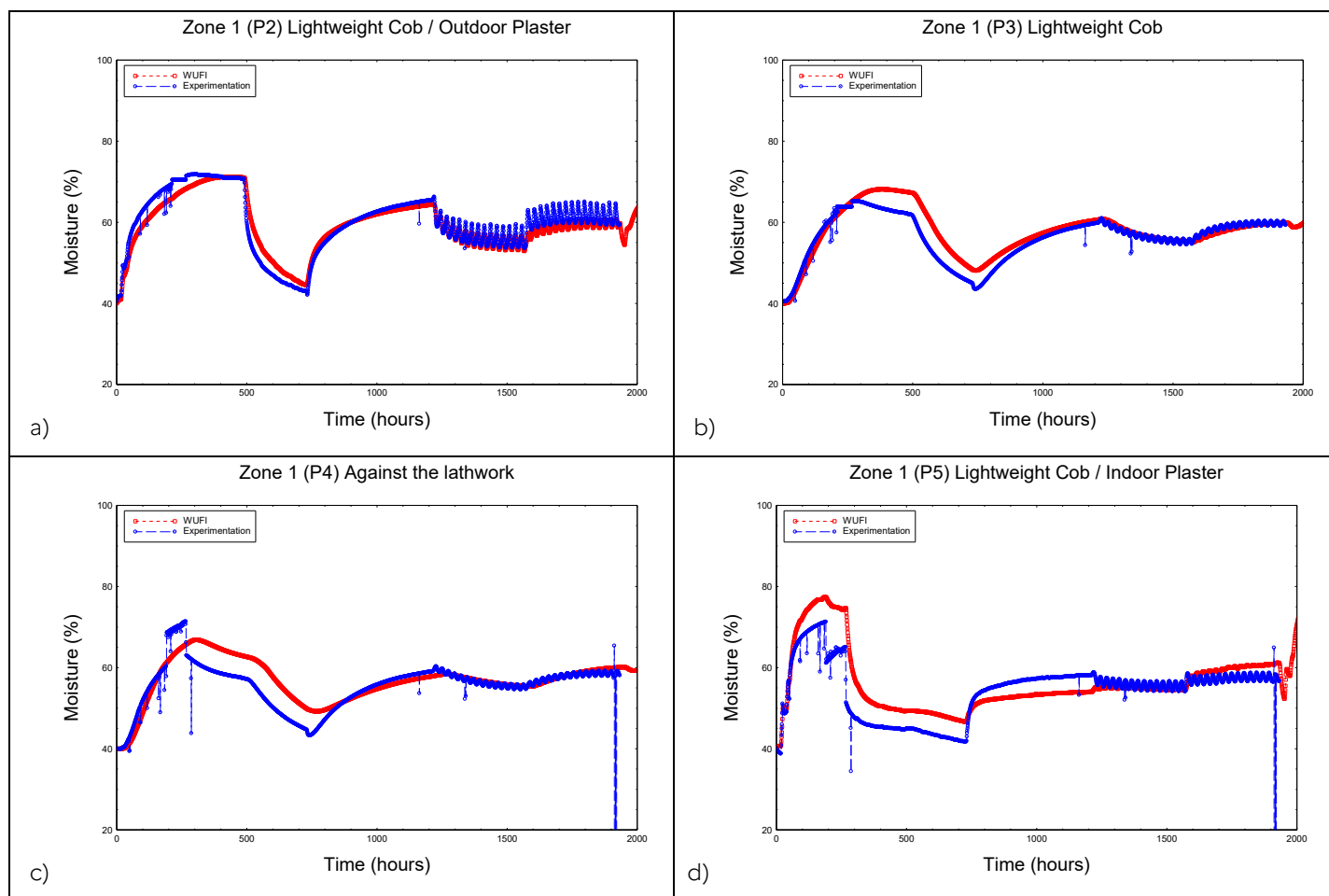


Figure 2 (Annexe B) : Évolution de l'humidité relative, mur nu, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5

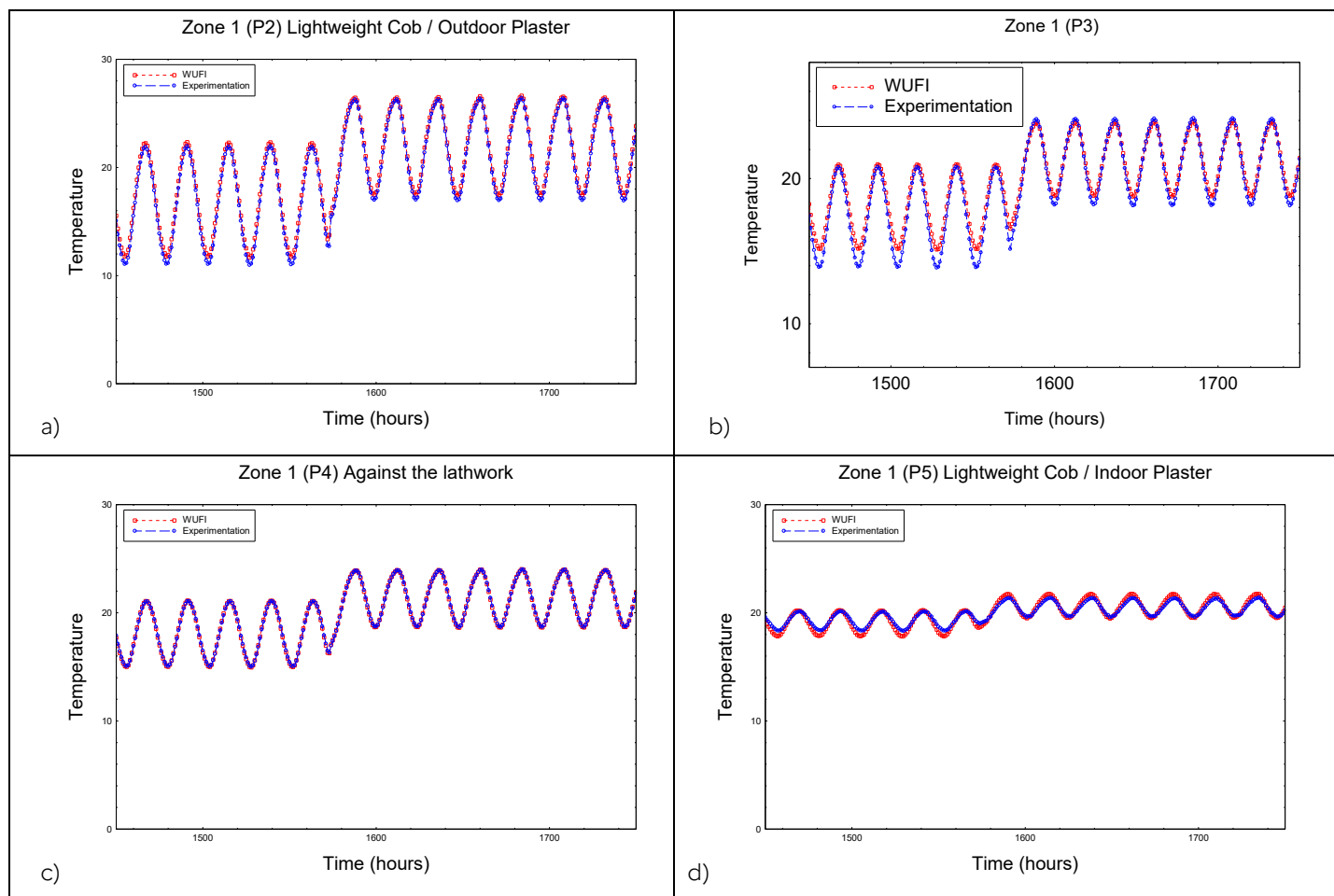


Figure 3 (Annexe B) : Évolution de la température mur nu, en régime dynamique, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P3 / c) P4 / d) P5

B-3 Évolution de la température au sein du mur avec ITI (Torchis allégé)

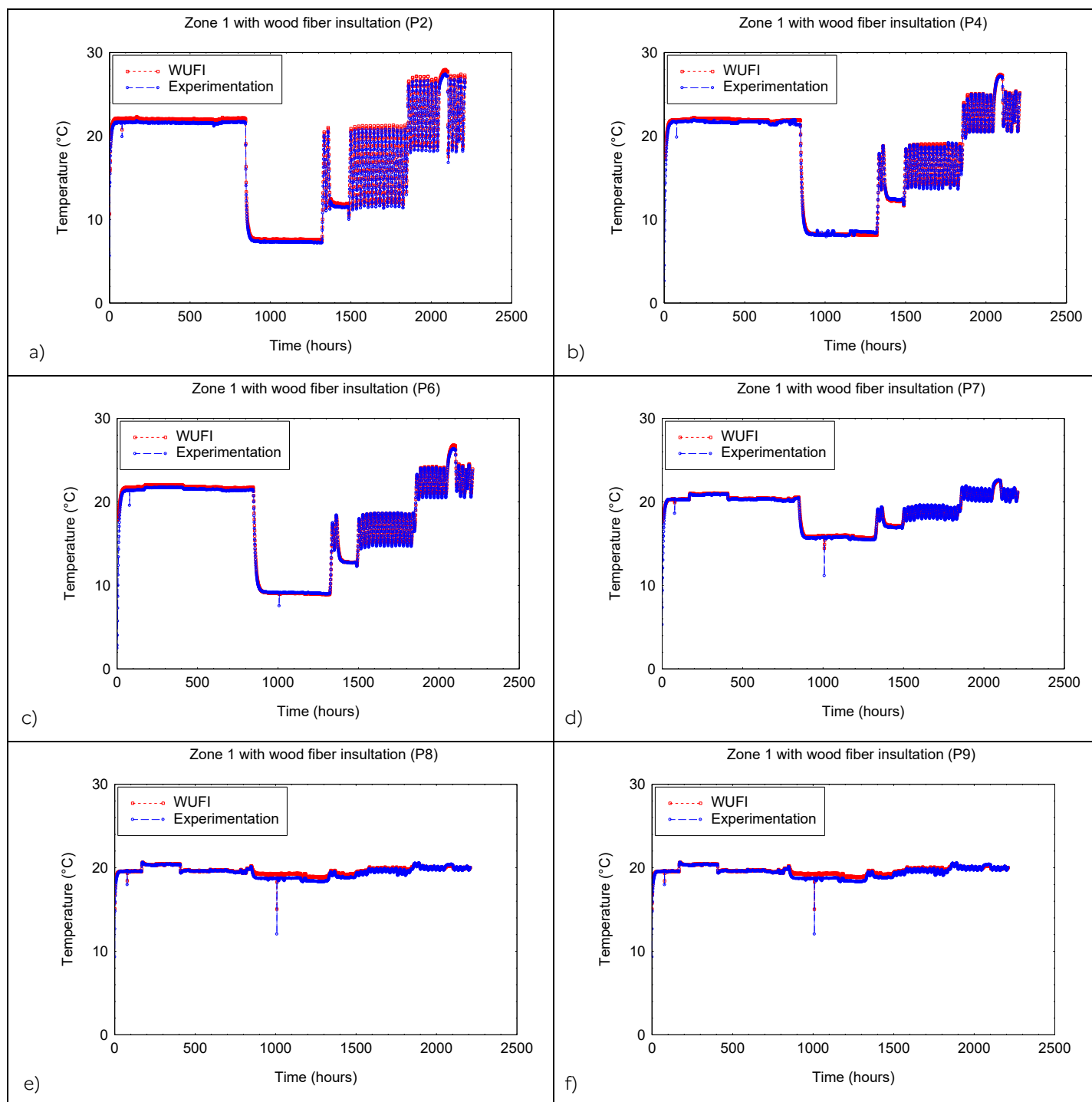


Figure 4 (Annexe B) : Évolution de la température, mur isolé, zone 1, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

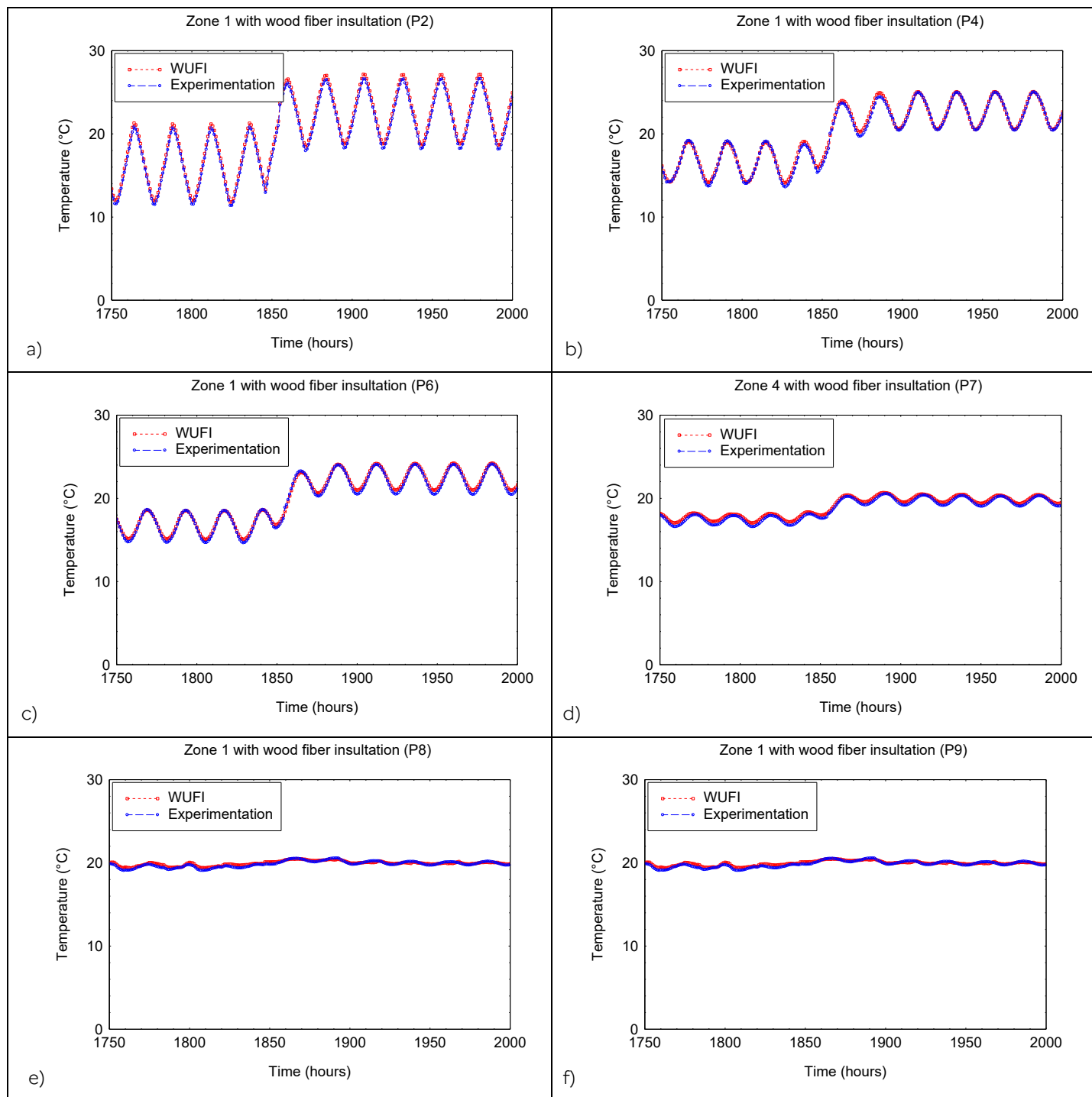


Figure 5 (Annexe B) : Zoom sur l'évolution de la température, mur isolé, en régime dynamique, zone 1, à différents points : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

B-4 Évolution de l'HR au sein du mur isolé (Torchis allégé)

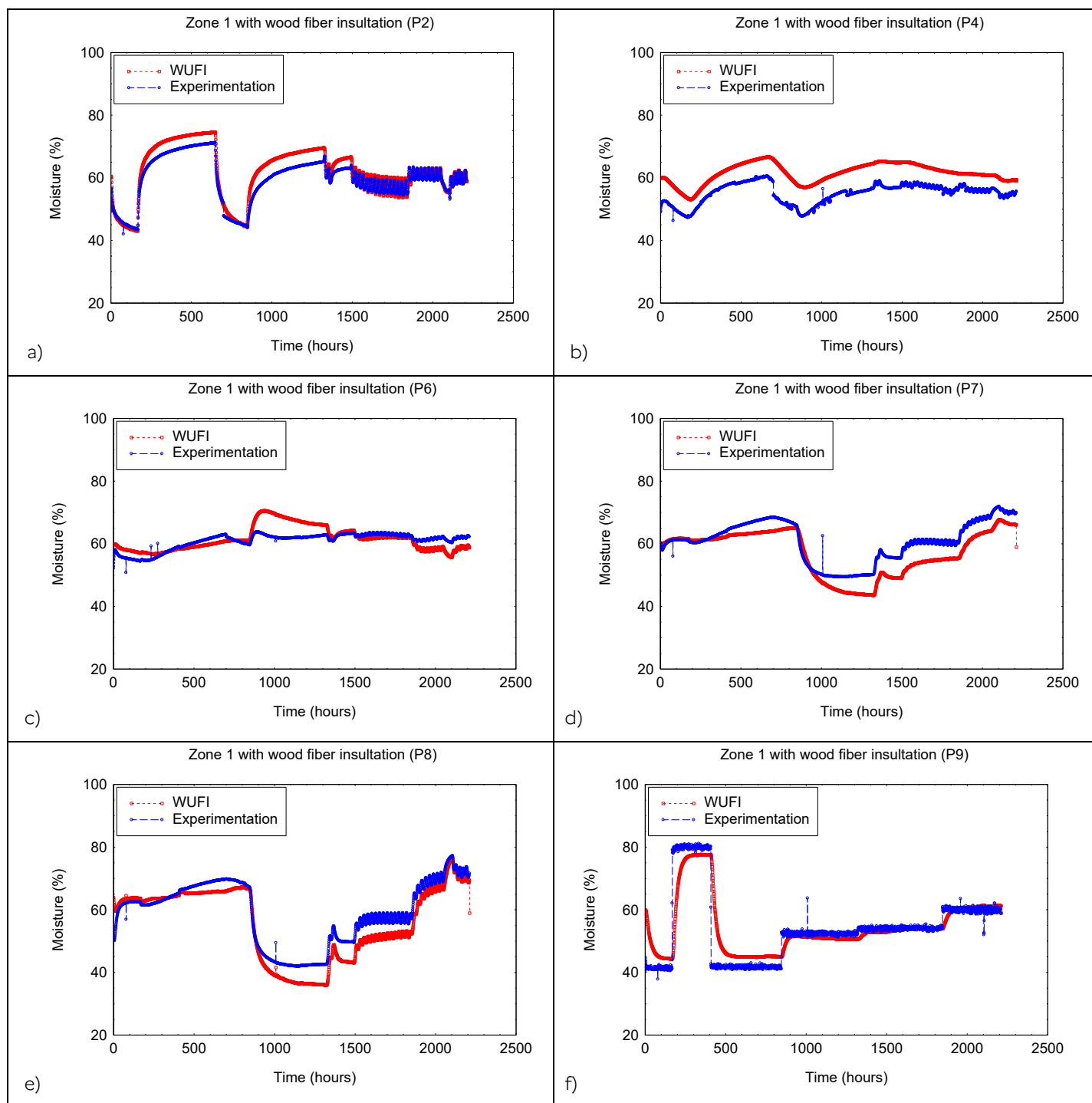


Figure 6 (Annexe B) : Évolution de l'humidité relative, mur isolé laine de bois, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

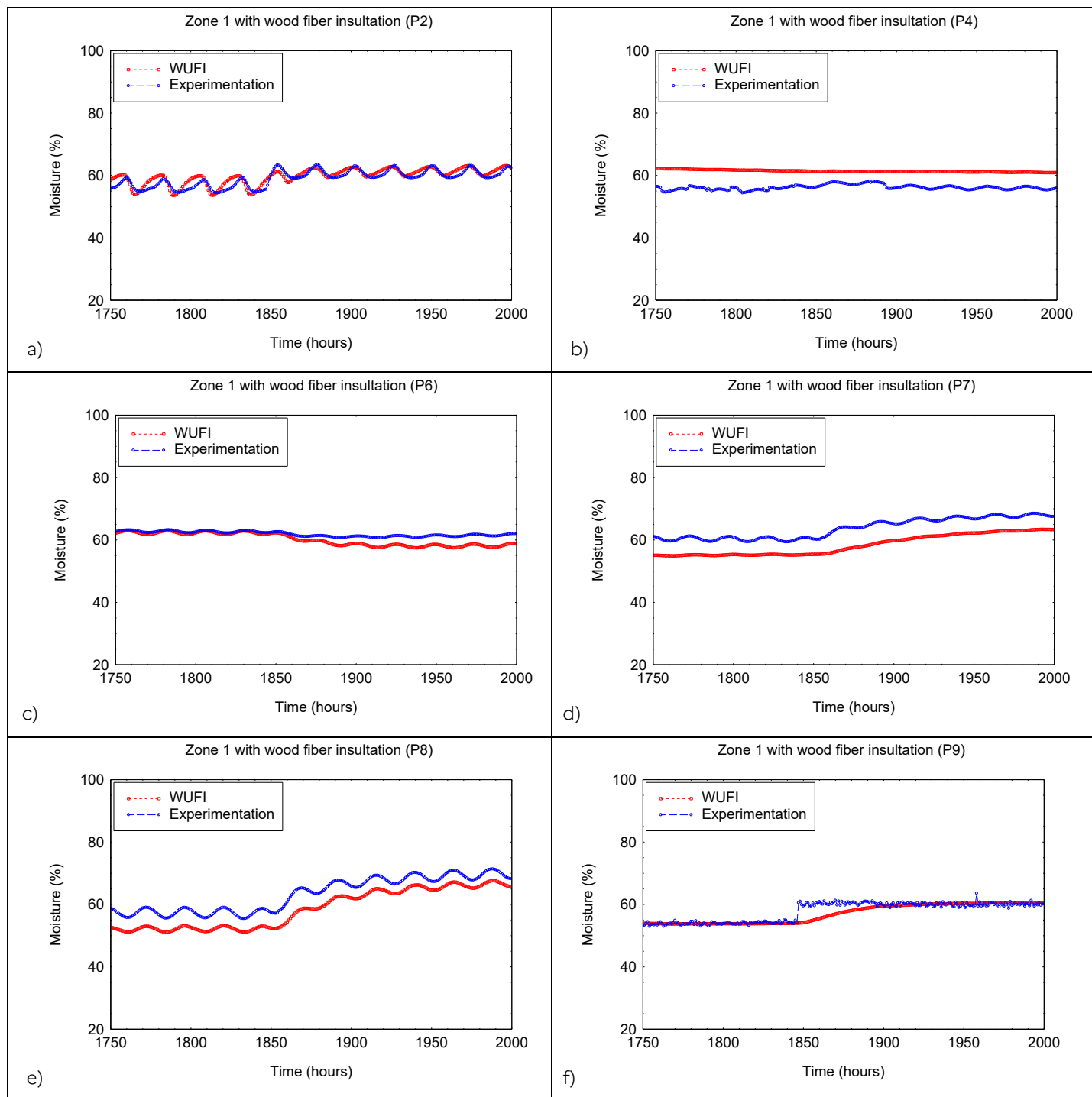


Figure 7 (Annexe B) : Évolution de l'humidité relative, mur isolé laine de bois, en régime dynamique, zone 1, à différent point : a) P2 / b) P4 / c) P6 / d) P7 / e) P8 / f) P9

Annexe C

Calcul coefficient U

Comme indiqué dans le lot estimations de paramètres, l'objectif de la détermination des conductivités thermiques de l'isolant en fonction de la température et l'humidité relative est le calcul du coefficient U en fonction des mêmes variables.

Nous présentons les résultats dans les figures 1 à 8. L'évolution des conductivités thermiques de l'isolant et du coefficient de transmission surfacique du mur U y est indiquée ainsi que le U théorique calculé selon les règles RT.

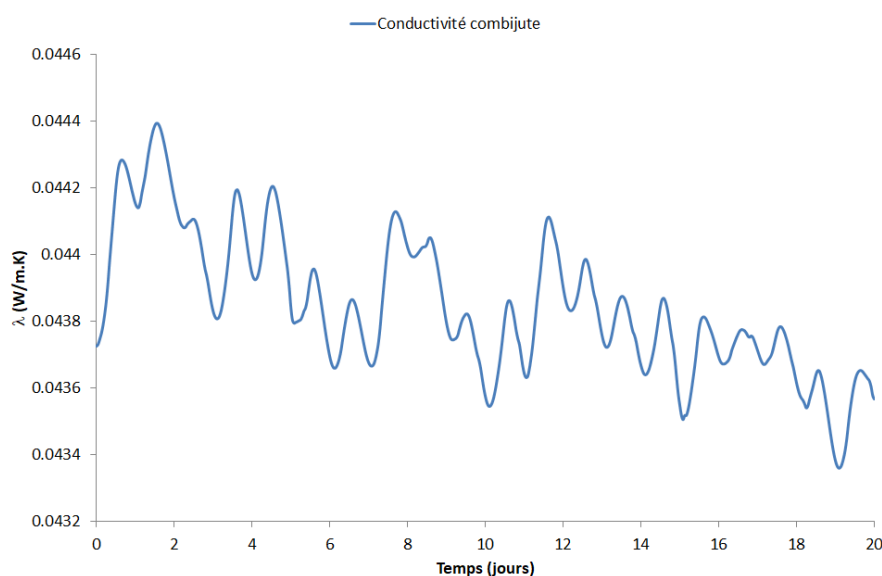


Figure 1 (Annexe C) : Conductivité thermique combijute été 2023.

La conductivité thermique de référence du combijute est égale à 0.04 W/m.K. Si on analyse les figures 1 et 3, nous constatons que cette variable passe en moyenne à 0.044 pour les mesures d'été à 0.052 à la suite du traitement des mesures de printemps. Par conséquent, le coefficient U de référence qui est égale à 0.23 W/m².K augmente à en moyenne 0.25 et 0.28 W/m².K (figures 2 et 4). L'augmentation est ainsi variable entre 8 et 18 %. Si on ramène ces valeurs en termes de déperditions énergétiques il est clair que la prise en compte des transferts couplés de chaleur et d'humidité est importante.

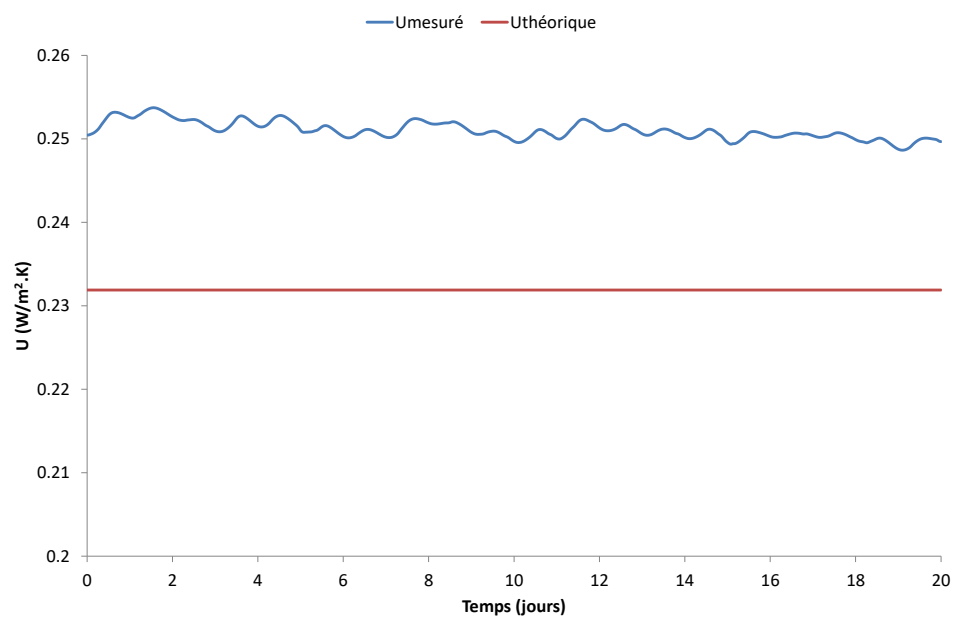


Figure 2 (Annexe C) : U mesuré mur avec combijute été 2023.

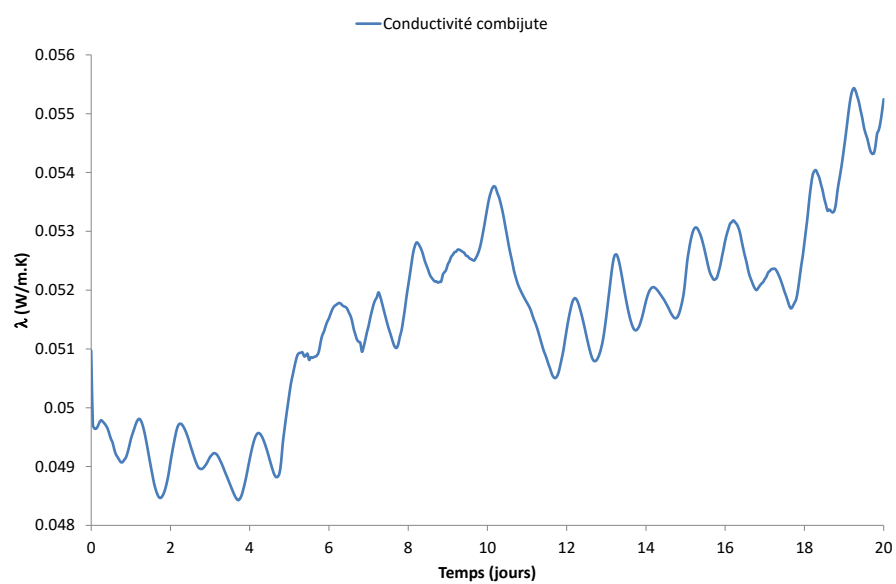


Figure 3 (Annexe C) : conductivité thermique combijute printemps 2024.

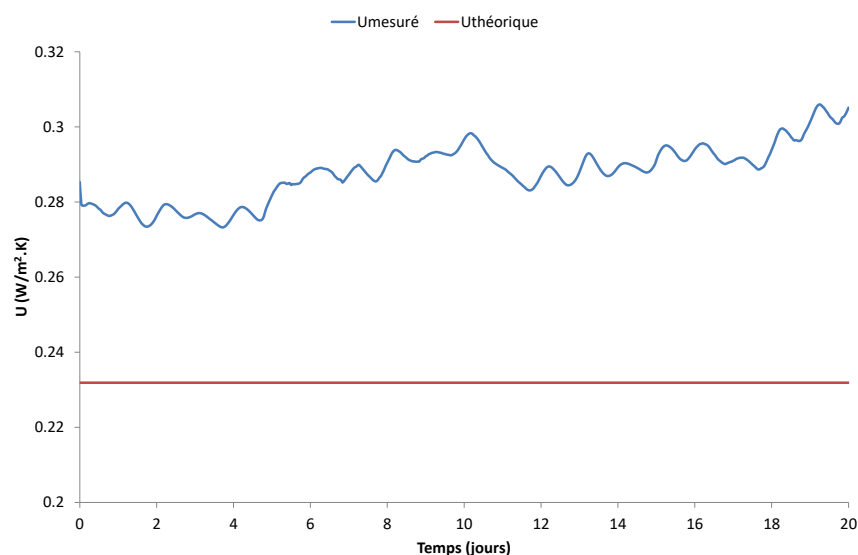


Figure 4 (Annexe C) : U mesuré mur avec combijute printemps 2024

Les analyses de l'isolant terre chanvre à partir des courbes 5 à 8, montrent que la conductivité thermique de ce matériau varie en moyenne de 0.118 à 0.122 $W/m.K$. Rappelons que sa conductivité de référence est égale à 0.09 $W/m.K$.

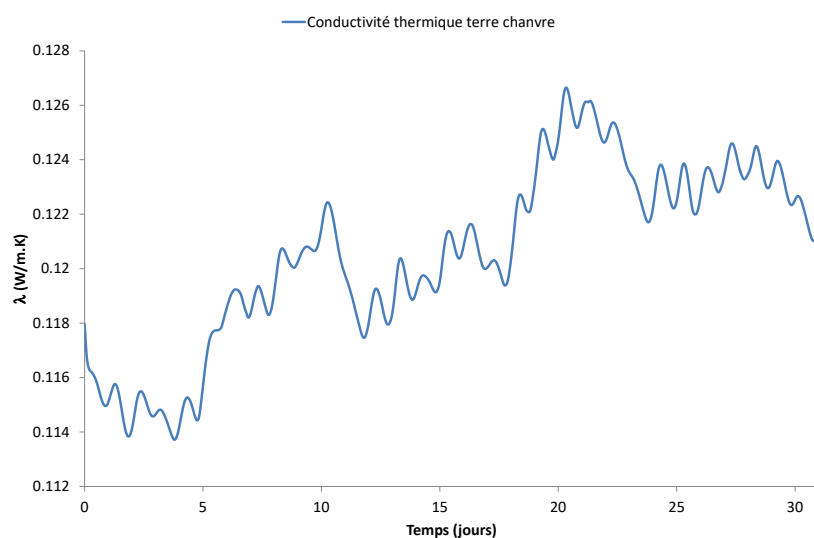


Figure 5 (Annexe C) : conductivité thermique terre chanvre printemps 2024.

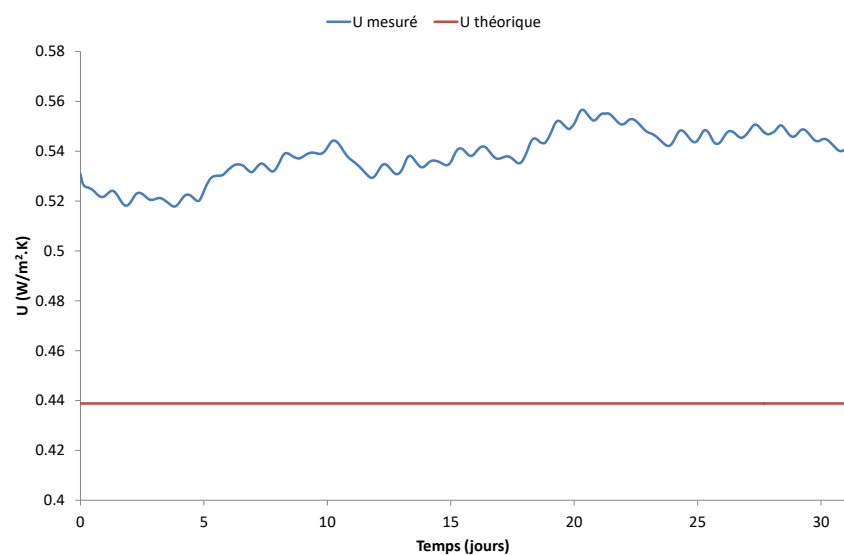


Figure 6 (Annexe C) : U mesuré mur avec terre chanvre printemps 2024

Le coefficient U de transmission surfacique du mur avec terre chanvre passe de 0.44 W/m².K à 0.52 W/m².K ; soit une augmentation d'environ 15 % par rapport à la valeur de référence.

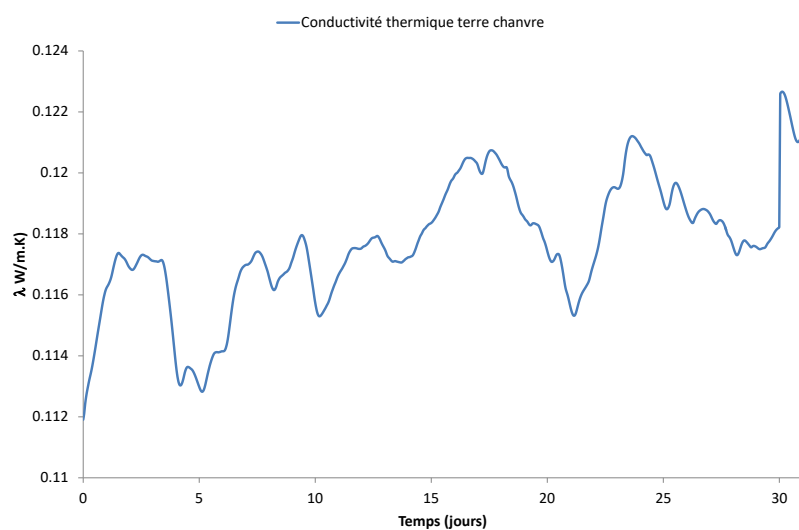


Figure 7 (Annexe C) : conductivité thermique terre chanvre hiver 2024.

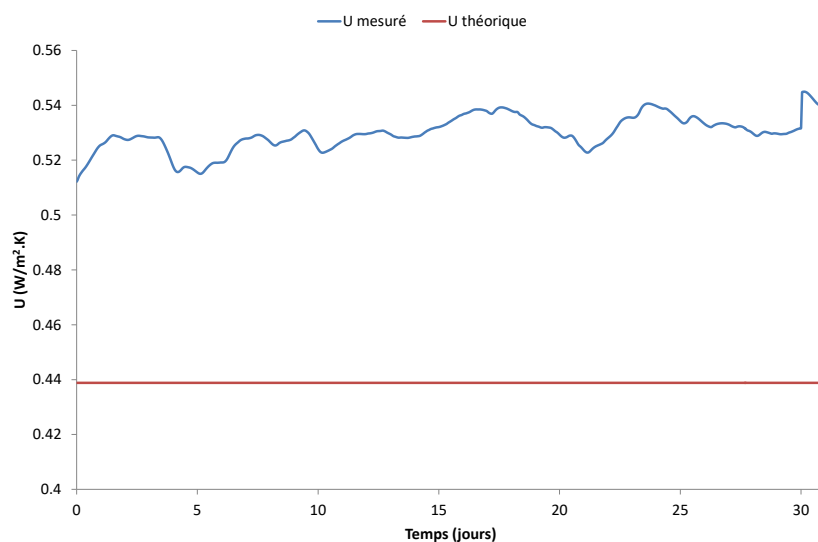


Figure 8 (Annexe C) : U mesuré mur avec terre chanvre hiver 2024

En conclusion nous pouvons affirmer que la nécessité de prendre en compte la variation du coefficient U en fonction de l'évolution des températures et des humidités relatives est importante pour un calcul plus précis de ce coefficient. Il faut cependant, tenir compte du calcul d'incertitudes pour évaluer le niveau d'acceptabilité des résultats obtenus.

L'ADEME EN BREF

Au cœur des missions qui lui sont confiées par le ministère de la Transition écologique, le ministère en charge de l'Energie et le ministère en charge de la Recherche, l'ADEME - l'Agence de la transition écologique – partage ses expertises, assure le financement et l'accompagnement de projets de transformation dans des domaines variés : énergie, économie circulaire, décarbonation de l'industrie, mobilité, bâtiment, qualité de l'air, consommation et production responsables, alimentation durable, bioéconomie, gestion des sols, adaptation au changement climatique et transition juste.

L'ADEME mobilise les citoyens, les entreprises et les territoires pour les aider à progresser vers une société plus sobre en carbone et économe en ressources. Résolument engagée dans la lutte contre le changement climatique et la dégradation des ressources, elle conseille, facilite et soutient les initiatives, de la recherche à la diffusion des solutions.

Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), l'ADEME met également ses capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

www.ademe.fr

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



EXPERTISES

Isolation Hygroscopique et Biosourcée des Bâtiments Anciens

Le projet ISOLHYBBA vise à approfondir les connaissances sur le comportement hygrothermique des bâtiments à colombages isolés à l'aide de matériaux hygroscopiques et géo ou biosourcés.

Une base de données des propriétés hygrothermiques des solutions d'isolation géo et biosourcées et des matériaux de construction a été constituée.

Une campagne de mesures expérimentales in situ a été menée pour caractériser les transferts hygrothermiques sur une façade d'un bâtiment test à colombages.

Des essais complémentaires ont été réalisés en laboratoire.

Des outils de simulation dynamique ont été utilisés pour analyser le comportement hygrothermique des configurations de murs étudiées.

Le coefficient U a été estimé en fonction des variations de température et d'humidité à l'aide d'un modèle numérique basé sur une méthode inverse. Enfin, un cahier de recommandations à destination des professionnels de la réhabilitation du bâti ancien a été élaboré.