



INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
STRASBOURG



Formation d'Ingénieur-e
Génie Thermique, Energétique et Environnement
Parcours Architecte Ingénieur-e

Promotion : 2024

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté par

COMBES LISA

*DES OUTILS PEDAGOGIQUES POUR
DEVELOPPER LES SOLUTIONS BIOSOURCEES
ET GEOSOURCEES DANS LE BATIMENT*

Tuteur Entreprise : GUIDAT Stéphane

Tuteur pédagogique : BURGER Denis

Formation d'Ingénieur-e
Génie Thermique, Energétique et Environnement
Parcours Architecte - Ingénieur-e

Promotion : 2024

Fiche d'objectifs - PFE

NOM : COMBES

Prénom : Lisa

TITRE DU PFE :

Des outils pédagogiques pour développer les solutions biosourcées et géosourcées dans le bâtiment.

SPECIFICITES ET CONTEXTE DU PROJET :

Ce projet est réalisé pour le compte du Collectif Biosourcés Grand Est, qui cherche à promouvoir et valoriser l'utilisation des matériaux biosourcés et géosourcés de la région Grand Est dans les projets de construction neuve et de rénovation. Cependant, tous ses membres sont des professionnels de la construction de la région qui travaillent bénévolement pour le collectif, ce qui a un impact sur le temps qu'ils peuvent lui consacrer.

Plus spécifiquement, ce projet portera sur des systèmes d'isolation biosourcées/géosourcées utilisables pour la rénovation de bâtiment dans le Grand Est, et tiendra ainsi compte des spécificités de cette région.

OBJECTIFS ET LIVRABLES ATTENDUS :

OBJECTIF :

- Mettre à la disposition du Collectif Biosourcés Grand Est des outils pédagogiques permettant de valoriser des solutions biosourcées/géosourcées (atouts, performances et points de vigilances objectivés) pour un public varié (scolaires, professionnel-le-s, maîtrise d'ouvrage, grand public, ...)

LIVRABLES ATTENDUS :

- Mémoire de synthèse expliquant la démarche et pouvant servir de référentiel aux professionnels de la construction
- Notes de calculs
- Outils de valorisation des solutions retenues et étudiées
- Optionnel : Cahier des charges de prototypes types à fournir aux MOA/MOE qui portent ce type de projets

PLAN D' ACTIONS :

Ma méthode envisagée de PFE peut se découper en trois parties :

PARTIE 1 : Recensement de solutions existantes

Objectif : Choisir les solutions (isolants et systèmes constructifs) que je vais étudier de façon approfondie

- Recensement de diverses techniques d'isolation via deux procédés :
 - D'une part, via un inventaire des ATEC/DTA de matériaux biosourcés/géosourcés existants sur le site du CSTB, par la suite affiné grâce à divers critères/hypothèses

- D'autre part, via un recensement de projets de réhabilitation réalisé dans le Grand Est avec isolations biosourcée/géosourcée, pour mettre en avant les possibles matériaux/méthodes qui sont déjà mis en œuvre
- Filtrage de ces techniques via divers paramètres et hypothèses, à faire valider par le Collectif Biosourcés Grand Est
- Sélection des solutions à étudier en détails en accord avec le collectif, qui pourront être des solutions ITI/ITE

PARTIE 2 : Etudes des solutions (divers outils / hypothèses)

Objectif : Mener une étude complète de chaque solution choisie

- Définition d'une / de plusieurs paroi-s de référence et des hypothèses nécessaires pour baser les études, en accord avec le collectif
- Baser la comparaison sur une/des valeur-s de résistance thermique parmi :
 - Valeur R imposée par la Réglementation Thermique existant
 - Valeur R à atteindre pour les primes CEE
 - Valeur R de référence pour le Label BBC résidentiel rénovation 2024
 - Valeur R minimale pour le Label EnerPHit (passif en rénovation)
- Mener les études en prenant en compte divers paramètres :
 - Les règles de mise en œuvre
 - Les performances thermiques, hydriques, acoustiques, ...
 - L'impact carbone (ACV)
- Comparaison possible avec les techniques constructives plus « traditionnelles » pour montrer les différences de performances et d'impact environnemental

PARTIE 3 : Elaboration des outils de communication

Objectif : Choisir et produire les outils les plus pertinents pour le collectif, afin de valoriser le travail effectué

- La liste exhaustive de ces outils n'est pas encore définie et dépendra en partie des études et leurs résultats

PLANNING PREVISIONNEL :

Voir le planning ci-dessous

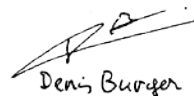
Validé le 04/12/2023

par : Stéphane Guidat

Tuteur Entreprise :



Tuteur Ecole :



Denis Burger

PLANNING PREVISIONNEL

- PARTIE 1** : Choix des solutions et paramètres à étudier
- PARTIE 2** : Etude des solutions et simulations sur logiciels
- PARTIE 3** : Réalisation des outils pédagogique
- FINAL** : Fin de la rédaction, rendu et préparation de la soutenance
 - Réunions avec le collectif
 - Dates clés du stage

| ETAPE | SEMAINE | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 |
| PARTIE 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PARTIE 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PARTIE 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FINAL | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| REUNIONS | ○ | ● | ○ | ● | | ● | | ●○ | | ● | | ● | ○ | ● | | ●○ | ○ | ○ |

RESUME / ABSTRACT / ABSTRAKT

La rénovation du parc bâti existant et l'utilisation de matériaux biosourcés sont deux pistes principales identifiées pour atteindre la neutralité carbone du secteur de la construction d'ici à 2050. Dans ce contexte, les filières se structurent et des initiatives se créent à diverses échelles pour développer ces pratiques et informer des publics divers. Ce PFE propose ainsi une méthodologie reproductible d'étude de complexes d'isolation, applicables en rénovation de murs existants, aboutissant à la création d'outils pédagogiques. Les complexes mettent en œuvre des isolants biosourcés et/ou géosourcés issus de filières locales du Grand Est et des matériaux standardisés pour comparaison. A travers la caractérisation des matériaux, les simulations des comportements hydriques et thermiques des complexes isolants et l'évaluation de leur impact environnemental, l'étude met en avant les spécificités des bâtis ancien et moderne ainsi que la complexité de comparaison des solutions. En effet, elle met en perspective la notion d'inertie thermique et relève le poids majeur de l'ACV dans le choix d'un complexe isolant.

The renovation of existing buildings and the use of bio-sourced materials have been identified as two of the main ways of achieving carbon neutrality in the construction sector by 2050. In this context, sectors are being structured and initiatives are created at various levels to develop these practices and inform a variety of audiences. This end-of-study project proposes a reproducible methodology for studying insulation complexes, applicable to the renovation of existing walls, leading to the creation of educational tools. The complexes use biosourced and/or geosourced insulation materials from local resources in the Grand Est region and standardised materials for comparison. By characterising the materials, simulating the hydric and thermal behaviour of the insulating complexes and assessing their environmental impact, the study highlights the specific features of old and modern buildings, as well as the complexity of comparing solutions. In fact, it puts the notion of thermal inertia into perspective and highlights the major weight of LCA in the choice of an insulating complex.

Die Renovierung des bestehenden Gebäudebestands und die Verwendung biobasierter Materialien sind zwei Hauptwege, die identifiziert wurden, um die CO₂-Neutralität des Bausektors bis 2050 zu erreichen. In diesem Zusammenhang werden Branchen strukturiert und Initiativen auf verschiedenen Ebenen gegründet, um diese Praktiken zu entwickeln und verschiedene Zielgruppen zu informieren. In diesem Abschlussprojekt wird eine reproduzierbare Methode zur Untersuchung von Dämmstoffkomplexen für die Renovierung bestehender Wände vorgeschlagen, die zur Erstellung von Lehrmitteln führen. In den Komplexen verwenden biobasierte und/oder geobasierte Dämmstoffe aus lokalen Produktionsketten der Region Grand Est und standardisierte Materialien zum Vergleich. Durch die Charakterisierung der Materialien, die Simulationen des Wasser- und Wärmeverhaltens der Dämmstoffkomplexe und die Bewertung ihrer Umweltauswirkungen hebt die Studie die Besonderheiten alter und moderner Gebäude sowie die Komplexität des Vergleichs von Lösungen hervor. Die Studie setzt den Begriff der thermischen Trägheit in Perspektive und weist auf die Bedeutung, dass die Ökobilanz bei der Wahl eines Dämmstoffs eine wichtige Rolle spielt.

REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer ma gratitude aux nombreuses personnes qui ont contribué à la concrétisation de mon Projet de Fin d'Etudes (PFE) à la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Grand Est, en m'apportant leur aide pendant cette dernière étape importante de mes études d'ingénieur.

Dans un premier temps, je voudrais remercier mes deux tuteurs de PFE. Un grand merci à GUIDAT Stéphane, mon tuteur entreprise à la DREAL Grand Est, pour sa bienveillance, sa disponibilité, son soutien et son encadrement. Je lui suis aussi reconnaissante pour son investissement en amont du stage, qui a permis d'aboutir à la création de mon sujet de projet, un sujet passionnant et ancré dans les problématiques environnementales et constructives actuelles. Un grand merci également à BURGER Denis, mon tuteur pédagogique à l'INSA Strasbourg, pour le suivi qu'il m'a apporté, son enthousiasme et ses conseils.

Je remercie ensuite les équipes des différents pôles de l'antenne strasbourgeoise de la DREAL Grand Est pour leur accueil chaleureux, leur bonne humeur et les quelques moments que nous avons pu partager. Je remercie tout particulièrement HUEBER Michel, chef du pôle Construction Durable, de m'avoir donné l'opportunité de faire mon stage dans son service, pour sa bienveillance et sa compréhension. Merci également à FEISTHAUER Monique, assistante, CHELGHAM Linda, responsable de la coordination administrative et WACK Laurence, cheffe adjointe du pôle Construction Durable, pour leur gentillesse et leur aide dans les diverses procédures administratives rencontrées.

Je souhaite poursuivre en remerciant le Collectif Biosourcés Grand Est (CBGE), pour le compte duquel j'ai effectué ce PFE, d'avoir conjointement créé le sujet d'étude avec mon tuteur entreprise et de m'avoir confié ce projet. Je remercie les membres du CBGE avec lesquels j'ai pu échanger pour leur confiance, leur aide, leurs retours et leur engouement, à savoir MAIRE Etienne, BROCKSTEDT Katharina, HOUSSACK Adeline, MARCZAK Pierre-Olivier, LEBRETON-MARCZAK Anne-Claire, GAULARD Jean-Marc, KOEBERLE Maurine, BRUN François, ROSA Cédric, DELANGLE Estelle, MARCINIAK Laurent et SIETTEL François.

J'adresse également mes remerciements à toutes les personnes référentes qui, en plus de membres du CBGE, m'ont apporté leur aide et/ou leur expertise sur des thématiques diverses. Je remercie ainsi COURGEY Samuel de l'association Arcanne pour le temps qu'il m'a consacré, ses conseils et pour m'avoir permis d'assister à une de ses formations sur l'humidité dans les parois, HEBERLE Elodie du CEREMA pour son temps, ses ressources et son aide quant à l'exploitation du logiciel WUFI®, GARCIA Coralie du RFCP pour notre échange et son expertise sur la mise en œuvre de l'ITE paille et BEN YAHMED Anissa du CEREMA, pour le partage de ressources sur l'inertie qui m'ont été indispensables. De plus, je tiens à remercier trois professeurs de l'INSA pour leur aide quant au logiciel Pleiades : BURGER Denis, mon tuteur, pour ses conseils et son appréciation des hypothèses et démarche envisagées, BOUVENOT Jean-Baptiste, pour son soutien technique et WALTHER Edouard pour ses explications et retours sur mes simulations ; il m'a en outre donné l'opportunité d'être co-auteur d'un article basé sur toute une partie des hypothèses, simulations et résultats de ce PFE.

Enfin, je remercie chaleureusement ma sœur Maiwenn, mes parents Nathalie et Thierry et mes ami-e-s pour leurs encouragements et leur soutien émotionnel inconditionnel, pendant ce PFE notamment, mais aussi pendant les six années d'études qui ont précédé. Leur présence est pour moi indispensable.

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| RESUME / ABSTRACT / ABSTRAKT | 6 |
| REMERCIEMENTS..... | 7 |
| SOMMAIRE | 8 |
| LISTE DES FIGURES..... | 10 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 11 |
| LISTE DES ABREVIATIONS..... | 12 |
| NOMENCLATURE | 13 |
| GLOSSAIRE | 15 |
| INTRODUCTION | 17 |
| PREMIERE PARTIE – CHOIX DES SOLUTIONS ET PARAMETRES ETUDIE·E·S | 19 |
| 1. REGLEMENTATION ET REGLES DE L'ART | 19 |
| 2. METHODOLOGIE DU PROJET | 19 |
| 3. SOLUTIONS ET PARAMETRES RETENU·E·S..... | 21 |
| 3.1. MURS EXISTANTS DE REFERENCE | 21 |
| 3.2. SOLUTIONS A ETUDIER..... | 21 |
| 3.3. SOLUTIONS STANDARDISEES POUR COMPARAISONS | 21 |
| 3.4. PARAMETRE INITIAL DE LA COMPARAISON..... | 22 |
| 3.5. PARAMETRES A ETUDIER | 22 |
| 4. HYPOTHESES GENERALES DE L'ETUDE | 23 |
| 4.1. MODULES NECESSAIRES | 23 |
| 4.2. CLIMAT EXTERIEUR CONSIDERE..... | 23 |
| 4.3. LOGICIELS UTILISES | 24 |
| 4.4. PREREQUIS DE L'ETUDE | 25 |
| DEUXIEME PARTIE – ETUDE DES SOLUTIONS RETENUES | 26 |
| 1. PRINCIPES FONDAMENTAUX..... | 26 |
| 1.1. PROPRIETES HYDRIQUES..... | 26 |
| 1.2. PROPRIETES THERMIQUES..... | 29 |
| 1.3. PROPRIETES ENVIRONNEMENTALES – ANALYSE DU CYCLE DE VIE | 33 |
| 2. SPECIFICITES ET POINTS DE VIGILANCE | 35 |
| 2.1. MURS EXISTANTS | 35 |
| 2.2. ISOLATION THERMIQUE..... | 36 |
| 3. SOLUTIONS APPLICABLES ET ETUDIEES | 37 |
| 3.1. DENOMINATIONS DES CAS | 37 |
| 3.2. COMPOSITION DES PAROIS | 38 |
| 3.3. PROPRIETES PRINCIPALES CONSIDEREES..... | 38 |
| 4. SIMULATIONS HYGROTHERMIQUES – WUFI® | 40 |
| 4.1. CAS SIMULES ET HYPOTHESES DES SIMULATIONS | 40 |
| 4.2. RESULTATS ET ANALYSE | 41 |

| | | |
|---|---|----|
| 4.3. | COMPARAISON AVEC UBAKUS | 50 |
| 5. | SIMULATIONS THERMIQUES – PLEIADES | 51 |
| 5.1. | CAS SIMULES ET HYPOTHESES DES SIMULATIONS | 51 |
| 5.1. | RESULTATS ET ANALYSE | 53 |
| 6. | ACV | 57 |
| 6.1. | CAS CALCULES ET HYPOTHESES DES ACV | 57 |
| 6.2. | RESULTATS ET ANALYSE | 58 |
| 7. | POUR ALLER PLUS LOIN | 61 |
| TROISIEME PARTIE – CREATION DES OUTILS PEDAGOGIQUES | | 62 |
| 1. | OUTILS A REALISER | 62 |
| 1.1. | OBJECTIF ET CHOIX DES OUTILS..... | 62 |
| 1.2. | CONTENU DES FICHES PEDAGOGIQUES | 63 |
| 2. | EXEMPLES DE FICHES..... | 63 |
| CONCLUSION | | 73 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | | 75 |
| LISTE DES DOCUMENTS ANNEXES | | 81 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1 – Règles de l’Art. Adapté de « Pôle prévention produits », par l’AQC. (s. d.). AQC. Consulté le 04/01/2024. https://qualiteconstruct ion.com/aqc/nos-missions/pole-prevention-produits/ [29]..... | 19 |
| Figure 2 – Proposition d’isolants et paramètres | 19 |
| Figure 3 – Validation et légitimation des proposition et méthode..... | 20 |
| Figure 4 – Création des bases de données et hypothèses..... | 20 |
| Figure 5 – Réalisation de l’étude et analyse critique des résultats..... | 20 |
| Figure 6 – Fichier météo Nancy, RCP 4.5 horizon 2100 : Courbe d’évolution de la température extérieure | 24 |
| Figure 7 – Fichier météo Nancy, RCP 4.5 horizon 2100 : Courbe d’évolution de l’humidité relative extérieure..... | 24 |
| Figure 8 – Déphasage $\eta(T)$ et facteur d’amortissement f pour $T = 24$ h | 32 |
| Figure 9 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, torchis – Evolution de la teneur en eau totale de la paroi [kg/m^2] | 43 |
| Figure 10 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, pan de bois – Evolution de la teneur en eau totale de la paroi [kg/m^2]..... | 44 |
| Figure 11 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, torchis – Evolution de la teneur en eau du torchis [kg/m^3] | 44 |
| Figure 12 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, pan de bois – Evolution de la teneur en eau du pan de bois [kg/m^3] | 44 |
| Figure 13 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau de l’enduit chaux extérieur [kg/m^3] | 45 |
| Figure 14 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau de la paille [kg/m^3] | 45 |
| Figure 15 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau de l’enduit chaux existant [kg/m^3] | 45 |
| Figure 16 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau de l’enduit plâtre intérieur [kg/m^3]..... | 46 |
| Figure 17 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Isoplèthe de la surface intérieure | 46 |
| Figure 18 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l’interface bois, torchis (côté bois) [% _{bs}]..... | 48 |
| Figure 19 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l’interface bois, torchis (côté torchis) [% _{bs}] | 48 |
| Figure 20 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l’interface bois, paille (côté bois) [% _{bs}]..... | 48 |
| Figure 21 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l’interface bois, paille (côté paille) [% _{bs}] | 49 |
| Figure 22 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de l’HR de l’air à l’interface paille, enduit chaux extérieur (côté paille) [% _{bs}] | 49 |
| Figure 23 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l’interface paille, enduit chaux extérieur (côté enduit) [% _{bs}] | 49 |
| Figure 24 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l’interface paille, enduit chaux extérieur (côté paille) [% _{bs}] | 50 |
| Figure 25 – Ubakus : Simulation 4.1 – Condensation à l’interface paille, enduit chaux extérieur pour $HR_e = 85$ % et $T_e = -4,6$ °C..... | 51 |
| Figure 26 – Pleiades STD : Maison modélisée - Vue en plan..... | 52 |
| Figure 27 – Pleiades STD : Maison modélisée - Vue en 3D | 52 |
| Figure 28 – Pleiades AMAPOLA : Voile béton, base – Optimisation des inconforts hivernal et estival | 53 |
| Figure 29 – Pleiades AMAPOLA : Voile béton – Comparaison des besoins de chauffages des quatre variantes..... | 54 |
| Figure 30 – Pleiades AMAPOLA : Voile béton – Comparaison degré-heures d’inconfort des quatre variantes | 55 |
| Figure 31 – Pleiades AMAPOLA : Voile béton, base – Evolution des degré-heures d’inconfort en fonction de l’effusivité thermique..... | 55 |
| Figure 32 – Pleiades STD : Voile béton – Courbes de température pendant la semaine la plus chaude (du 13 au 20 août)..... | 56 |
| Figure 33 – ACV : Impact sur le réchauffement climatique [$\text{kg}_{\text{eq CO}_2}$]..... | 58 |
| Figure 34 – ACV : Déchets non dangereux éliminés [kg]..... | 59 |
| Figure 35 – ACV : Déchets dangereux éliminés [kg]..... | 59 |
| Figure 36 – ACV : Déchets radioactifs éliminés [kg]..... | 59 |
| Figure 37 – ACV : Utilisation de ressources d’énergie primaire [MJ PCI]..... | 60 |
| Figure 38 – ACV : Utilisation nette d’eau douce [m^3] | 60 |
| Figure 39 – Validation des choix, forme et contenu des fiches pédagogiques | 62 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 – Paliers de détermination de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau via S_d | 26 |
| Tableau 2 – Paliers de détermination de l'hygroscopicité via $VCTH$ | 27 |
| Tableau 3 – Paliers de détermination de l'hygroscopicité via w_{80} | 28 |
| Tableau 4 – Paliers de détermination de la capillarité via A_w | 28 |
| Tableau 5 – Paliers de détermination de l'inconfort estival via DH | 33 |
| Tableau 6 – Dénominations des murs existants..... | 37 |
| Tableau 7 – Dénominations et faisabilité des simulations..... | 37 |
| Tableau 8 – Compositions des parois existantes considérées..... | 38 |
| Tableau 9 – Compositions des complexes d'isolation considérées..... | 38 |
| Tableau 10 – Propriétés des matériaux considérées..... | 39 |
| Tableau 11 – WUFI® Pro : Hypothèses communes à toutes les simulations..... | 40 |
| Tableau 12 – WUFI® 2D : Hypothèses modifiées par rapport à WUFI® Pro..... | 41 |
| Tableau 13 – PACTE : Critères de validation des simulations hygrothermiques..... | 41 |
| Tableau 14 – Paille : Lien entre le développement de micro-organismes et les teneurs en eau..... | 42 |
| Tableau 15 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, torchis uniquement – Résultats « Fenêtre de résumé » et valeurs w_f | 43 |
| Tableau 16 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 (et 5.1), pan de bois uniquement – Résultats « Fenêtre de résumé » et valeurs w_f | 43 |
| Tableau 17 – WUFI® Pro : Résumé des résultats des autres simulations..... | 46 |
| Tableau 18 – WUFI® 2D : Résumé des résultats des autres simulations..... | 50 |
| Tableau 19 – Pleiades STD : Hypothèses communes à toutes les simulations..... | 51 |
| Tableau 20 – Pleiades STD : Scénario d'occupation..... | 52 |
| Tableau 21 – Pleiades STD : Compositions des autres parois..... | 52 |
| Tableau 22 – Pleiades AMAPOLA : Variantes considérées des scénarios de ventilation et d'occultation..... | 53 |
| Tableau 23 – Pleiades AMAPOLA : Hypothèses modifiées pour chaque variante simulée..... | 53 |
| Tableau 24 – Pleiades AMAPOLA : Autres murs, cas initiaux existant – Besoins de chauffage et degré-heures d'inconfort..... | 56 |
| Tableau 25 – Calculs de déphasages et d'amortissements thermiques via la méthode des admittances..... | 57 |
| Tableau 26 – ACV : Hypothèses communes à tous les calculs..... | 58 |

LISTE DES ABREVIATIONS

FRANÇAIS

| ACRONYME | SIGNIFICATION |
|----------|---|
| ACV | Analyse du Cycle de Vie |
| ATec | Avis Technique |
| AQC | Agence Qualité construction |
| BBC | Bâtiment Basse Consommation |
| C2P | Commission Prévention Produit |
| CBGE | Collectif Biosourcés Grand Est |
| CEE | Certificat d'Economie d'Energie |
| CLO | Courte Longueur d'Onde |
| CO2 | Dioxyde de Carbone |
| COV | Composé Organique Volatile |
| CSTB | Centre Scientifique et Technique du Bâtiment |
| DED | Données Environnementales par Défaut |
| DH | Degré-heure |
| DREAL | Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement |
| DTA | Document Technique d'Application |
| DVE | Durée de Vie Estimée |
| DVR | Durée de Vie de Référence |
| ELAN | Evolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique |
| FDES | Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire |
| GES | Gaz à Effet de Serre |
| GIEC | Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat |
| HR | Humidité Relative |
| INSA | Institut National des Sciences Appliquées |
| ITE | Isolation Thermique par l'Extérieur |
| ITI | Isolation thermique par l'Intérieur |
| LTECV | Loi relative à la Transition Energétique pour la Croissance Verte |
| ONU | Organisation des Nations Unies |
| PACTE | Programme d'Action pour la qualité de la Construction et de la Transition Energétique |
| R+1 | Premier étage |
| RDC | Rez-De-Chaussée |
| RE2020 | Réglementation Environnementale 2020 |
| PER | Période d'Etude de Référence |
| PFE | Projet de Fin d'Etude |
| PSE | Polystyrène Expansé |
| RT | Réglementation Thermique |
| STD | Simulation Thermique Dynamique |
| TREMI | Travaux de Rénovation Energétique des Maisons Individuelles |
| UF | Unité Fonctionnelle |
| VMC | Ventilation Mécanique Contrôlée |

ANGLAIS

| ACRONYME | SIGNIFICATION |
|----------|---------------------------------------|
| COP | Conference Of the Parties |
| RCP | Representative Concentration Pathways |

NOMENCLATURE

LETTRES MINUSCULES

| NOTATION | UNITE | SIGNIFICATION |
|------------------------|---|--|
| <i>a</i> | $[m^2 \cdot s^{-1}]$ | Diffusivité thermique |
| <i>b</i> | $[W \cdot s^{0,5} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ | Effusivité thermique |
| <i>d</i> | $[kg \cdot m^{-2}]$ | Transport sous forme de vapeur d'eau |
| <i>e</i> | [m] | Epaisseur |
| <i>f</i> | [-] | Facteur d'amortissement thermique |
| <i>f_{CO2}</i> | [-] | Coefficient de pondération des impacts d'une émission de GES |
| <i>k</i> | $[kg \cdot m^{-2}]$ | Transport capillaire |
| <i>m</i> | [kg] | Masse |
| <i>t</i> | [s] | Temps |
| <i>t_{dif}</i> | [s] | Temps de diffusion |
| <i>w₈₀</i> | $[kg \cdot m^{-3}]$ | Teneur en eau de référence |
| <i>w</i> | $[kg \cdot m^{-3}]$ | Teneur en eau |
| <i>w_f</i> | $[kg \cdot m^{-3}]$ | Teneur en eau à saturation |

LETTRES MAJUSCULES

| NOTATION | UNITE | SIGNIFICATION |
|-------------------------------|------------------------------------|--|
| <i>A</i> | [-] | Amortissement thermique |
| <i>A_w</i> | $[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-0,5}]$ | Coefficient d'absorption de la pluie battante |
| <i>B</i> | $[kg \cdot m^{-2}]$ | Bilan hydrique |
| <i>B_{chauf}</i> | $[kWh \cdot m^{-2}]$ | Besoins de chauffage |
| <i>C</i> | $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ | Capacité thermique massique |
| <i>DE</i> | [variable] | Valeur de l'impact d'un composant pour une phase de cycle de vie |
| <i>DH</i> | [°C · h] | Degré-heures |
| <i>DVE</i> | [an] | Durée de vie estimée d'un composant |
| <i>DVR</i> | [an] | Durée de vie de référence d'un composant |
| <i>D_{ws}</i> | $[m^2 \cdot s^{-1}]$ | Coefficients de transport liquide par succion |
| <i>D_{ww}</i> | $[m^2 \cdot s^{-1}]$ | Coefficients de transport liquide par redistribution |
| <i>HR</i> | [%] | Humidité relative |
| <i>I</i> | [variable] | Indicateurs calculés via la méthode statique d'ACV |
| <i>I_c</i> | $[kg_{CO2} \text{ éq}]$ | Impact carbone calculé via la méthode dynamique simplifiée d'ACV |
| <i>M_d</i> | $[kg \cdot m^{-3}]$ | Teneur en eau volumique |
| <i>Q</i> | [multiple de UF] | Quantité d'un composant |
| <i>PER</i> | [an] | Période d'étude de référence d'une ACV |
| <i>R</i> | $[m^2 \cdot K \cdot W^{-2}]$ | Résistance thermique |
| <i>S</i> | $[m^2]$ | Surface |
| <i>S_d</i> | [m] | Lame d'air équivalente |
| <i>T</i> | [h] | Période d'oscillation |
| <i>T_x</i> | [K] ou [°C] | Température de l'ambiance <i>x</i> |
| <i>\bar{T}_x</i> | [K] ou [°C] | Moyenne de température de l'ambiance <i>x</i> |
| <i>U</i> | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ | Coefficient de transmission thermique |
| <i>V</i> | $[m^3]$ | Volume |
| <i>VCTH</i> | $[g \cdot m^{-2} \cdot \%HR^{-1}]$ | Valeur de la capacité tampon hydrique |
| <i>W_s</i> | [% _{bs}] | Teneur en eau sur base sèche |
| <i>W_h</i> | [% _{bh}] | Teneur en eau sur base humide |

LETTRES GRECQUES

| NOTATION | UNITE | SIGNIFICATION |
|-----------|--|--|
| δ | [m] | Profondeur de pénétration de la chaleur |
| Δ | [-] | Différence entre deux grandeurs |
| η | [h] | Déphasage thermique |
| λ | [W · m ⁻¹ · K ⁻¹] | Conductivité thermique |
| μ | [-] | Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau |
| π | [-] | Pi ou constante d'Archimède |
| ρ | [kg · m ⁻³] | Masse volumique |
| ρC | [J · m ⁻³ · K ⁻¹] | Capacité thermique volumique |
| τ | [vol · h ⁻¹] | Taux de renouvellement d'air |
| φ | [rad] | Phase à l'origine d'une oscillation |

INDICES

| NOTATION | SIGNIFICATION |
|------------------------|---------------------------------|
| <i>ap rén</i> | Après rénovation |
| <i>av rén</i> | Avant rénovation |
| <i>basse</i> | Valeur maximale mesurée |
| <i>e</i> | Relatif à l'extérieur |
| <i>eau</i> | Relatif à l'eau |
| <i>finale</i> | Valeur finale d'une grandeur |
| <i>haute</i> | Valeur minimale mesurée |
| <i>humide ou utile</i> | Valeur à l'état humide |
| <i>i</i> | Relatif à l'intérieur |
| <i>idéale</i> | Valeur idéale théorique |
| <i>initiale</i> | Valeur initiale d'une grandeur |
| <i>l</i> | Surface gauche (extérieure) |
| <i>matériau</i> | Relatif à un matériau |
| <i>max</i> | Valeur maximale |
| <i>min</i> | Valeur minimale |
| <i>p</i> | Relatif à un composant <i>p</i> |
| <i>r</i> | Surface droite (intérieure) |
| <i>réelle</i> | Valeur réelle mesurée |
| <i>sec</i> | Valeur à l'état sec |

EXPOSANTS

| NOTATION | SIGNIFICATION |
|---------------------|---|
| <i>construction</i> | Relatif à la phase de construction de l'ACV |
| <i>exploitation</i> | Relatif à la phase d'exploitation de l'ACV |
| <i>fin de vie</i> | Relatif à la phase de fin de vie de l'ACV |
| <i>module D</i> | Relatif à la phase de module D de l'ACV |
| <i>production</i> | Relatif à la phase de production de l'ACV |
| <i>total</i> | Relatif au total des phases de l'ACV |

GLOSSAIRE

ABSORPTION :

Il s'agit de la propriété que présentent les solides et les liquides de retenir certaines substances (gaz ou liquides) dans la totalité de leur volume [19].

ADSORPTION :

L'adsorption est un phénomène par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur les surfaces solides. Par exemple sur les parois des cavités des matériaux [20].

BASE INIES :

Il s'agit de la base nationale des données environnementales et sanitaires de référence des produits de construction et équipements [21].

BATI ANCIEN :

Cette appellation concerne les bâtiments construits avant 1948 avec des matériaux naturels, peu transformés, trouvés dans l'environnement proche.

BATI MODERNE :

Cette appellation concerne les bâtiments construits entre 1948 et 1975 en matériaux industriels.

CARBONE BIOGENIQUE :

Le carbone biogénique est le carbone fixé par la plante suite à la photosynthèse à partir du CO₂ de l'air [22].

CARBONE FOSSILE :

Il s'agit des émissions de CO₂ d'origine fossile (pétrole, gaz naturel, charbon...) [22].

CONDENSATION CAPILLAIRE :

Il s'agit d'un phénomène de condensation de vapeur d'eau consécutive à une phase d'adsorption. Elle a lieu dans les pores de la grande majorité des matériaux lors de l'évolution de l'humidité relative [20].

CONDENSATION PAR SATURATION DE VAPEUR D'EAU :

La condensation par saturation de vapeur d'eau a lieu lorsque le point de rosée est atteint [20].

DESORPTION :

Il s'agit du phénomène inverse de l'adsorption [20].

DONNEES ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (DED) :

Les DED sont mises à disposition par le Ministère en charge de la construction. En l'absence de données spécifiques (FDES), elles permettent le calcul aussi complet que possible de l'ACV d'un bâtiment [23].

ECHANGE PAR CONDUCTION :

La conduction thermique est spécifique aux solides (bois, métaux, etc.), elle est un transfert direct au sein d'un milieu matériel, qui se fait par propagation de proche en proche de la chaleur. Le mouvement d'agitation thermique (flux de chaleur) va toujours des zones chaudes vers les zones froides [24].

ECHANGE PAR CONVECTION :

La convection thermique est spécifique aux fluides (liquide, gaz, air), ainsi qu'aux éléments déformables (comme les roches à hautes pressions dans le manteau terrestre), elle est liée au mouvement du fluide, donc à un transport de matière [24].

ECHANGE PAR RAYONNEMENT :

Le rayonnement thermique est une émission de rayonnement électromagnétique par un corps chaud, le rayonnement a la particularité de se déplacer dans le vide (rayonnement solaire). L'énergie électromagnétique reçue par le système est absorbée et convertie en énergie thermique (chaleur) [24].

ENERGIE PRIMAIRE E_p [kWh] :

C'est l'énergie non transformée, *i.e.* tirée de la nature (soleil, fleuves ou vent) ou contenue dans les produits énergétiques tirés de la nature (comme les combustibles fossiles ou le bois) [25].

ETIQUETTE SANITAIRE COV :

Cette étiquette indique le niveau d'émission du produit en polluants volatils par une classe allant de A+ (plus faibles émissions) à C (plus fortes émissions) [21].

FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE (FDES) :

Une FDES est un document normalisé qui présente les résultats de l'ACV d'un produit ainsi que des informations sanitaires dans la perspective du calcul de la performance environnementale et sanitaire du bâtiment pour son éco-conception. On distingue les FDES collectives, qui portent sur un même produit type fabriqué par plusieurs industriels, et les FDES individuelles, qui portent sur un produit fabriqué par un industriel [26].

HUMIDITE RELATIVE HR [%] :

L'humidité relative est le rapport entre la quantité de vapeur d'eau de l'air et la quantité maximale de vapeur qu'il peut contenir dans les mêmes conditions de température et de pression [20].

MATERIAU BIOSOURCE :

Les matériaux biosourcés sont les matériaux partiellement ou totalement issus de la biomasse [12].

MATERIAU GEOSOURCE :

Les matériaux géosourcés sont les matériaux issus de ressources d'origine minérale (terre crue, pierre sèche) [12].

MEMBRANE HYGROVARIABLE :

Il s'agit d'une membrane dont le comportement à la vapeur d'eau évolue selon le taux d'HR de l'air [20].

NEUTRALITE CARBONE :

Il s'agit de l'équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre [2].

PARE-VAPEUR :

Le pare-vapeur est une couche technique qui assure l'étanchéité à l'air du bâti et limite les flux de vapeur d'eau dans la paroi. Il est généralement entendu que le $S_d \text{ pare vapeur} \geq 5$ à 10 m [20].

POINT DE ROSEE :

Le point de rosé est la limite à partir de laquelle l'air ne peut plus contenir plus de vapeur d'eau, c'est-à-dire la limite de saturation en vapeur d'eau, soit lorsque $HR = 100\%$ [20].

POROSITE [%] :

La porosité désigne le pourcentage de vide par rapport au volume total [20].

REEMPLOI :

Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus [27].

RECYCLAGE :

Toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage [27].

REUTILISATION :

Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau [27].

INTRODUCTION

La crise climatique que nous traversons est une réalité qui a déjà eu des effets irréversibles. En participant activement à l'augmentation de la concentration des Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère, les activités humaines sont les principales responsables du réchauffement climatique observée depuis le début de l'ère industrielle, qui ne peut être expliqué par la variabilité naturelle du climat [1]. Face à ce constat, le premier accord international pour le climat a été adopté en 2015 lors de la COP21. Il s'agit de l'Accord de Paris, qui a fait émerger des objectifs communs : « [contenir] l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et [poursuivre] l'action menée pour limiter [...] à 1,5 °C » et atteindre la neutralité carbone [2]. Cependant, l'ONU a annoncé en septembre 2023 que « les mesures [actuelles] prises ne sont pas suffisantes pour atteindre les objectifs » [3].

Le secteur de la construction fait partie des plus gros émetteurs de GES à l'échelle planétaire. En 2021, il a été responsable 37 % des émissions, en considérant à la fois celles issues de l'utilisation des bâtiments ($\approx 10 \text{ GtCO}_2$) et de la production des matériaux de construction ($\approx 3,6 \text{ GtCO}_2$) [4]. Il est également très demandeurs en ressources et en énergie et constitue ainsi un levier d'action essentiel pour faire face aux enjeux climatiques. Dans son dernier rapport de mars 2023, le GIEC souligne son potentiel d'adaptation via des mesures telles que réduire et repenser nos consommations d'énergie et de ressources, améliorer le stockage du carbone, notamment grâce aux matériaux biosourcés, concevoir des enveloppes à haute performance et recycler et réutiliser les matériaux en fin de vie [5]. Ce rapport a notamment servi de principale base scientifique pour établir le premier bilan mondial de l'Accord de Paris durant la COP28 de 2023 et a conforté la France dans sa trajectoire [6]. En effet, les impacts du secteur de la construction y sont considérables, puisqu'il a engendré **25 % des émissions de GES** et de **45 % des consommations d'énergie finale** en 2021-2022 [7] et correspond à **70 % de la production nationale de déchets** (240,2 Mt en 2018) [8]. La réalisation des objectifs annoncés de réductions des émissions de GES et de consommation d'énergie finale¹ dépend ainsi grandement de l'action menée sur ce secteur. Plus spécifiquement, la France vise sa neutralité carbone d'ici à 2050. Pour ce faire, deux pistes ont notamment été identifiées : d'une part, prioriser la rénovation énergétique des bâtis existants [7], et d'autre part, utiliser des matériaux biosourcés [9].

Depuis une trentaine d'années, le taux de renouvellement du parc de logements ne s'élève qu'à 1 % par an – si on misait uniquement sur les nouvelles constructions, il faudrait ainsi une centaine d'années pour aboutir à un parc entièrement rénové – et en comparaison, la construction neuve exploite davantage de ressources et de terres agricoles. L'accent porte donc sur la rénovation de 27 millions de logements d'ici à 2050, soit 700000 rénovations annuelles ; or le nombre d'opérations actuel n'est que de 70000 à 80000 par an. Cette insuffisance s'explique par l'évolution des réglementations et principes concernant la construction neuve au dépend de la rénovation [7], par la complexité de prise en charge du bâti ancien notamment [10] et par la persistance de divers freins : coût des travaux trop élevé pour les ménages, sous-information du grand public, etc. [11]. Le Gouvernement a donc mis en place divers-*es* aides, services d'information et moyens pour accélérer la rénovation énergétique (cf. *Annexe 1*), un processus en grande évolution qui devrait aboutir prochainement à des dispositifs plus efficaces, et de nombreux-*ses* réglementations, labels et certifications ont déjà vu le jour (cf. *Annexe 2*).

Par définition, « les matériaux biosourcés sont les matériaux partiellement ou totalement issus de la biomasse [...] [et] les matériaux géosourcés sont les matériaux issus de ressources d'origine minérale » [12]. Il est néanmoins important de noter que ces définitions n'imposent pas de pourcentage minimum de matière naturelle, il faut donc être vigilant-e quant à ces appellations. Depuis quelques années, la mise en œuvre de tels matériaux est impulsée puisqu'elle offre divers avantages. La LTECV stipule que « l'utilisation des matériaux biosourcés [...] est encouragée par les pouvoirs publics lors de la construction ou de la rénovation des bâtiments » [13] et la loi ELAN relève que « les performances énergétiques, environnementales et sanitaires des bâtiments [...] répondent à des objectifs [...] de recours à des matériaux issus de ressources renouvelables, d'incorporation de matériaux issus du recyclage » [14]. En effet, ils sont pertinents dans le cadre de la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020) en diminuant l'impact carbone des bâtiments, facilitant la maîtrise des consommations d'énergie et améliorant le confort thermique [15]. Ils valorisent des ressources renouvelables, voire locales, et favorisent les emplois locaux non délocalisables et le développement économique des territoires [10]. Cependant, la massification de leur

¹ La France a pour objectifs de réduire ses émissions de GES de 40 % en 2030 et de 75 % en 2050 par rapport à 1990 et ses consommations d'énergie finale de 50 % en 2050 par rapport à 2012 [7]

utilisation se heurtent à des freins : assurabilité parfois complexe, analyse des risques plus longue, sujet trop méconnu, etc. [15].

Dans le cas spécifique de la rénovation du bâti existant, les isolants biosourcés participeraient à « une stratégie de rénovation rigoureuse » [7]. Néanmoins, ils sont encore très peu utilisés : l'enquête TREMI 2017, qui cible les rénovations de maisons individuelles entre 2014-2016, indique qu'ils n'ont concerné que 15 % des murs, 14 % des toitures/combles et 17 % des planchers bas [16] et l'enquête TREMI 2020, qui étudie la période 2017-2019, indique une baisse avec 10 % d'isolants biosourcés employés [17]. « La méconnaissance de leurs caractéristiques spécifiques et des désordres que leur emploi peut engendrer par cette méconnaissance » [18] constitue un des freins majeurs à leur popularisation. Il y a donc un réel enjeu à informer davantage tous les publics et à communiquer sur ces matériaux.

Ce Projet de Fin d'Etude (PFE) a été réalisé pour le compte du Collectif Biosourcés Grand Est (CBGE). Fondé fin 2020 par un groupe de professionnel-le-s de l'écoconstruction dans une dynamique de démocratisation, promotion et valorisation des matériaux biosourcés et géosourcés de la région Grand Est, la portée de son action se heurte encore à un manque de comparaisons techniques multicritères indépendantes opposables et d'outils pédagogiques opérationnels et concrets. De tels outils seraient cependant indispensables, puisqu'actuellement, l'explication des productions techniques effectuées par les bureaux d'étude aux client-e-s et différent-e-s acteur-ric-e-s constitue une part importante du métier d'architecte. Or tous les projets, notamment de rénovation, ne font appel à un-e architecte ; il est donc impératif que les autres corps de métiers « sachants », notamment les ingénieur-e-s, puissent faire preuve de pédagogie et contribuent à la vulgarisation des études, des connaissances et des principes techniques.

De ce fait, l'objectif principal de ce PFE est double. D'une part, il s'agit d'étudier et de confronter des solutions d'isolation, en se focalisant sur des moyens applicables pour rénover les murs extérieurs de maisons individuelles dans la région Grand Est, mettant en œuvre des matériaux issues de filières biosourcées et géosourcées locales. D'autre part, le but est de valoriser cette étude en outils pédagogiques, pour sensibiliser et informer des cibles diverses, allant du grand public aux professionnel-le-s de la construction. Ainsi, ce PFE cherche à répondre à la problématique suivante :

Comment valoriser une étude technique de complexes d'isolation en outils pédagogiques pour permettre une démocratisation des solutions biosourcées et géosourcées dans le bâtiment ?

Le projet a été coconstruit avec des membres du CBGE afin de définir précisément leurs besoins, mettre en place une démarche de comparaison et explorer les valorisations envisageables. Afin de conforter cette démarche, la méthodologie a été présentée à divers-es référent-e-s régionaux-les ou nationaux-les (cf. *Annexe 3*) pour qu'ils puissent valider son intérêt, sa pertinence et qu'elle réponde à un besoin national. Aussi, la démarche a été itérative et devait être reproductible et adaptable en fonction des résultats obtenus, des données disponibles et des retours avec les différent-e-s expert-e-s.

Ce rapport est organisé autour de trois grands axes. La première partie expose le processus de choix des isolants et systèmes à étudier ainsi que les paramètres et hypothèses principales de l'étude. La seconde partie détaille l'étude approfondie des solutions retenues et les conclusions qui peuvent en être tirées. Enfin, la dernière partie explicite la démarche de valorisation de cette étude en outils de communication pédagogiques, adaptés à des publics cibles variés.

PREMIERE PARTIE – CHOIX DES SOLUTIONS ET PARAMETRES ETUDIE·E·S

1. REGLEMENTATION ET REGLES DE L'ART

L'enjeu est de proposer des solutions qui correspondent à la Réglementation et aux Règles de l'Art. La Réglementation, définie par la législation française et les directives européennes, est d'application obligatoire. Les Règles de l'Art sont, quant à elles, d'application volontaire [28]. Elles sont présentées dans ce schéma :

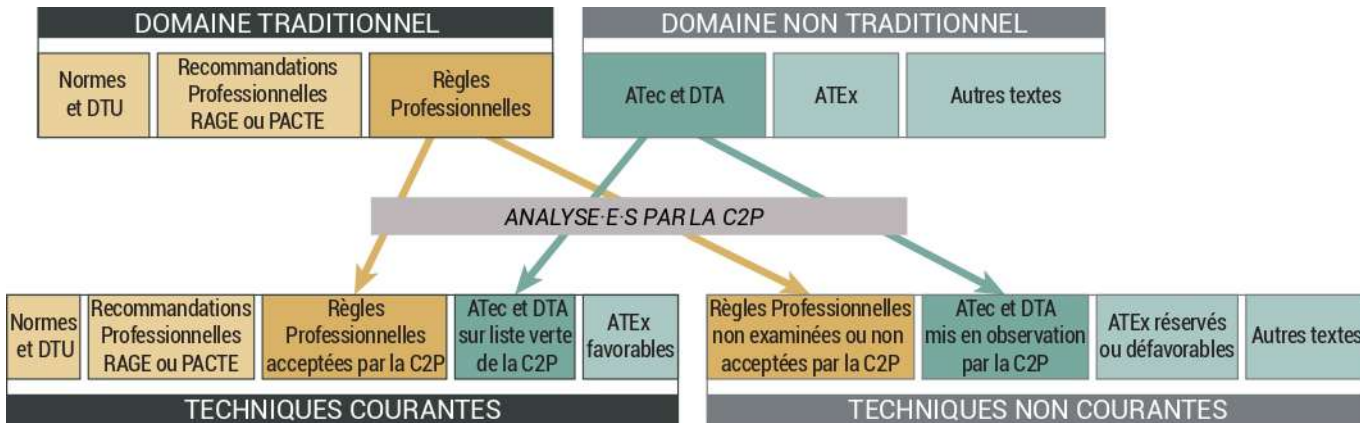


Figure 1 – Règles de l'Art. Adapté de « Pôle prévention produits », par l'AQC. (s. d.). AQC. Consulté le 04/01/2024. <https://qualiteconstruction.com/aqc/nos-missions/pole-prevention-produits/> [29]

Afin de garantir la pérennité des ouvrages et d'éviter les pathologies, les produits et procédés de construction sont divisés en deux domaines. Le domaine traditionnel regroupe les solutions issues de techniques éprouvées et décrites par des textes normatifs. Par opposition, le domaine non traditionnel désigne les solutions considérées innovantes et ne répondant pas à ces textes. Le cadre assurantiel fait apparaître les notions de technique courante, assurable de fait et sans surprime, et technique non courante [30], impliquant une discussion avec l'assureur, voire des surcoûts de l'assurance et/ou une évaluation spécifique.

2. METHODOLOGIE DU PROJET

Le schéma ci-contre explicite les éléments pris en compte pour aboutir à une proposition de solutions d'isolation et de paramètres à étudier, soumise au CBGE :

- D'une part, diverses études déjà effectuées ont permis de choisir les parois existantes de référence (types, matériaux et épaisseurs) et d'identifier des paramètres d'intérêt pour le projet ;
- D'autre part, la consultation des Règles de l'Art a permis de déterminer si les isolants préalablement sélectionnés sont décrits par un texte de référence en technique courante ou non, et de se baser sur le texte avec le plus haut niveau d'assurabilité le cas échéant (des normes aux Avis Techniques (ATec) et Documents Techniques d'Application (DTA)) ;
- Enfin, des retours d'expérience, issus de membres du CBGE et de fichiers de recensement de projet de rénovation en matériaux biosourcés, sont venus conforter les divers choix.

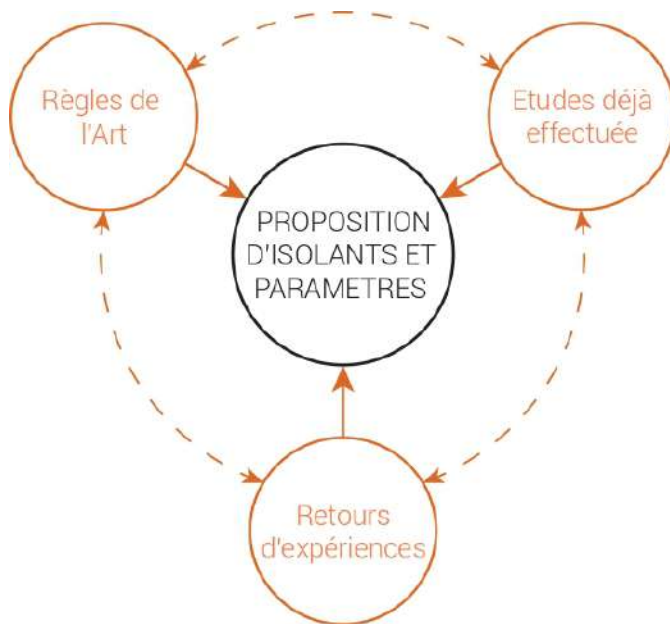


Figure 2 – Proposition d'isolants et paramètres

Au sein des Règles de l'Art, il a fallu effectuer un travail particulier sur les ATec et DTA. En effet, ils sont nombreux et tous recensés sur le site du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), que leur validité soit en cours ou dépassée, et ne sont pas triés par catégories. Ainsi, un inventaire des fiches de procédés biosourcés et/ou géosourcés a été effectué puis affiné selon divers critères (cf. *Annexe 4*) pour en sortir des ATec et DTA en cours de validité concernant des isolants pour murs utilisable en rénovation. La priorité a été mise sur les fiches inscrites sur la liste verte, c'est-à-dire analysées et validées par la Commission Prévention Produit (C2P), puis seulement sur celle non inscrite sur cette liste.

Pour valider et, au besoin, faire évoluer les proposition et méthode de travail envisagées, ces dernières ont tout d'abord été soumises aux membres du CBGE. Dans un second temps, elles ont été présentées à divers-es référent-e-s régionaux-les ou nationaux-les spécialisé-e-s dans les thématiques abordées et les logiciels utilisés, afin de valider définitivement et de légitimer les choix, le besoin, l'intérêt et la méthode :



Figure 3 – Validation et légitimation des proposition et méthode

Ensuite, le regroupement des paramètres à étudier en catégories (performances hydriques, thermiques, etc.) a permis d'identifier des méthodes d'évaluation adaptées de ces paramètres (logiciels, formules de calculs, etc.) et ainsi de constituer les différent-e-s bases de données et tableurs de calculs nécessaires et de formuler les hypothèses des calculs et simulations :

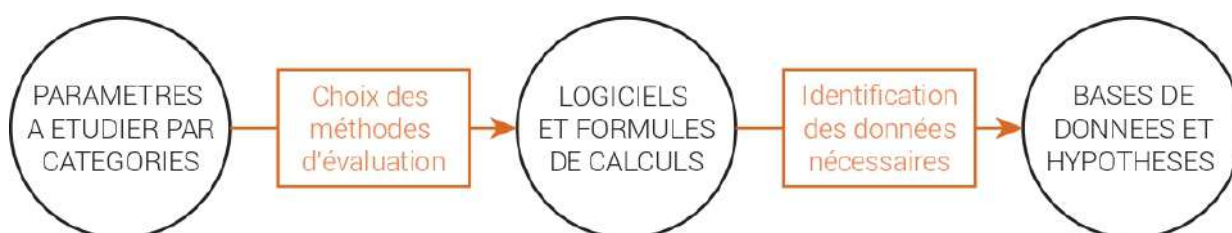


Figure 4 – Création des bases de données et hypothèses

Enfin, des référent-e-s ont été consulté-e-s pour valider les hypothèses des simulations et, au besoin, faire un point sur le fonctionnement des logiciels utilisés. Les résultats obtenus ont ensuite pu être analysés et critiqués à partir de leurs conseils, des documentations d'aide fournie par les logiciels, des conclusions d'autres rapports d'études et des connaissances acquises tout au long du parcours d'étude en ingénierie :

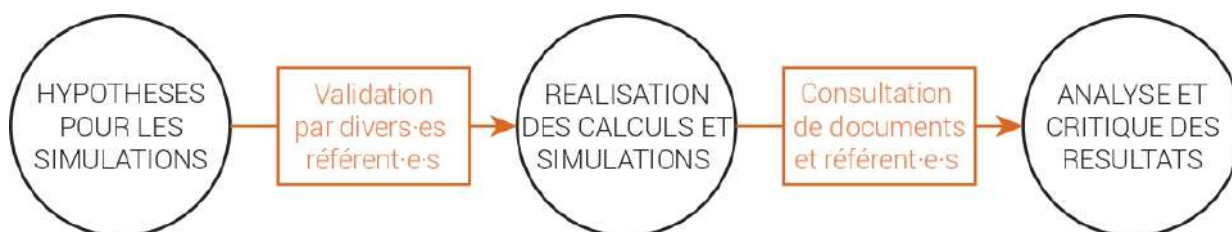


Figure 5 – Réalisation de l'étude et analyse critique des résultats

3. SOLUTIONS ET PARAMETRES RETENU·E·S

3.1. MURS EXISTANTS DE REFERENCE

L'objectif est de représenter, sans prétendre à l'exhaustivité, la diversité des murs extérieurs du bâti existant, ancien et moderne, dans le Grand Est.

BATI ANCIEN :

- Mur en pierres (grès et calcaire)
- Mur en briques de terre cuite pleines
- Mur à pan de bois (avec torchis / briques d'adobe)

BATI MODERNE :

- Mur en voile béton
- Mur en parpaings
- Mur en briques alvéolaires

Les catégories de murs sélectionnées sont issues des trois études suivantes, à savoir l'étude *Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien*, réalisée par le bureau d'étude Enertech [31], le *Guide de la rénovation de parois à l'aide de matériaux biosourcés*, écrit par le centre de ressource CODEM-Le BATLAB [10] et l'étude *HYGROBA : Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes*, menée par le CEREMA de l'Est, l'ENSA Toulouse, le LMDC de l'INSA Toulouse et la MPF [32].

Pour confirmer cette sélection et déterminer les types de pierres et les épaisseurs considérées, ce projet s'est basé sur trois autres études complémentaires, que sont l'étude *Habitat ancien en Alsace*, réalisée par le CEREMA Est et l'Atelier ODM SARL d'architecture [33], l'étude *Bien rénover mon logement en Lorraine*, réalisée par la DREAL Grand Est et le CEREMA Est [34] et le guide *Le bâti ancien Champardennais*, réalisé par Envirobat Grand Est ARCAD-LQE [35].

3.2. SOLUTIONS A ETUDIER

L'objectif est de considérer les différentes filières biosourcées et géosourcées régionales, en prenant en compte à la fois les matériaux isolants et les revêtements des parois. Pour les revêtements extérieurs, seul le cas des enduits est considéré.

ISOLATIONS THERMIQUES PAR L'EXTERIEUR (ITE) :

- Panneau de fibre de bois rigide
- Botte de paille de blé

ISOLATIONS THERMIQUES PAR L'INTERIEUR (ITI) :

- Laine de bois semi-rigide
- Laine de chanvre
- Laine de mouton
- Ouate de cellulose insufflée
- Laine de coton recyclé
- Béton de chanvre-chaux
- Béton de chanvre-terre

REVETEMENTS EXTERIEURS :

- Enduit chaux

REVETEMENTS INTERIEURS :

- Enduit terre
- Enduit plâtre
- Fermacell

3.3. SOLUTIONS STANDARDISEES POUR COMPARAISONS

L'objectif est de comparer les solutions énoncées ci-dessus avec les procédés plus conventionnels et de montrer ainsi les différences de performances, de domaine d'application, d'impact carbone, de risques de pathologies associées, etc.

ISOLANTS CONVENTIONNELS :

- Polystyrène expansé (PSE)
- Laine de roche
- Laine de verre

REVETEMENTS CONVENTIONNELS :

- Plaque de plâtre
- Enduit plastique
- Enduit ciment

3.4. PARAMETRE INITIAL DE LA COMPARAISON

Pour pouvoir comparer diverses solutions entre elles et déterminer les épaisseurs de matériaux dans les compositions des parois étudiées, il est nécessaire de s'appuyer sur un paramètre initial. La résistance thermique constitue actuellement un des seuls paramètres réglementaires inscrits dans la Réglementation Thermique (RT) Existant par élément. Aussi, dans le cadre des primes ou labels, d'application volontaire, des valeurs de résistances thermiques nécessaires ou indicatives sont mentionnées.

RESISTANCE THERMIQUE :

- RT Existant par élément en zone climatique H1 (dont le Grand Est fait partie) [36] :
 - $R \geq 3,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-2}$, pour les murs extérieurs
- Prime Certificat d'Economie d'Energie (CEE) [37] et Label BBC rénovation résidentiel 2024 [38] :
 - $R \geq 3,7 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-2}$, pour les murs en ITI
 - $R \geq 4,4 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-2}$, pour les murs en ITE
- Label EnerPHit (passif) selon la méthode des composants pour un climat frais tempéré (nord du pays) [39] :
 - $U \leq 0,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \rightarrow R \geq 2,86 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-2}$, pour les murs en ITI
 - $U \leq 0,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \rightarrow R \geq 6,67 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-2}$, pour les murs en ITE

Dans la suite du rapport, les valeurs de références considérées seront celles pour la Prime CEE et le Label BBC rénovation résidentiel 2024 pour l'ITI et l'ITE.

3.5. PARAMETRES A ETUDIER

L'objectif est d'étudier des paramètres multiples. La liste ci-dessous détaille l'ensemble des paramètres dont l'évaluation semble pertinente, mais tous ne pourront pas être traités dans le temps du PFE.

PERFORMANCES HYDRIQUES :

- Comportement à la vapeur d'eau → Coefficient de résistance à la vapeur d'eau μ et lame d'air équivalente S_d
- Comportement hygroscopique (confort hygrothermique) → Valeur du tampon hydrique $VTCH$ (ou MBV) et teneur en eau de référence w_{80}
- Comportement capillaire → Coefficient d'absorption d'eau A_w
- Teneurs en eau volumique et massique sur base sèche et humide
- Comportement à l'eau → Hygro-vulnérabilité (matériau putrescible, altérable, vulnérable) → Stabilité, maintien et dégradation des performances

PERFORMANCES THERMIQUES :

- Paramètres de base → Conductivité thermique λ , masse volumique ρ , capacité thermique massique C
- Résistance thermique R et coefficient de transmission thermique surfacique U
- Inertie thermique intérieure → Diffusivité thermique a , temps de diffusion t_{dif} , profondeur de pénétration de la chaleur $\delta(T)$ et effusivité thermique b
- Inertie thermique de transmission → Amortissement thermique A , facteur d'amortissement thermique $f(T)$ déphasage thermique $\eta(T)$
- Inconfort thermique → Besoins de chauffages B_{chauf} et degré-heures d'inconfort DH

PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES :

- Analyse du Cycle de Vie (ACV) dynamique → Durée de vie, impact et stockage carbone, production de déchets, utilisation de ressources
- Fin de vie du matériau : capacité à être réemployé, réutilisé ou recyclé

FABRICATION ET MISE EN ŒUVRE :

- Références de fabricants
- Lieux de fabrication
- Importances des revêtements
- Confort de mise en œuvre

ASSURABILITE :

- Domaine d'application
- Textes de références

FINANCES :

- Fourchette de prix (fourniture + pose)
- Paramètres influençant le prix
- Surplus du coup à l'achat et/ou à l'installation comparé aux économies énergétiques possibles

CONFORT INTERIEUR & PERFORMANCES ACOUSTIQUES :

- Qualité de l'air → COV et putrescibilité des matériaux
- Sensation de paroi froide
- Isolement acoustique → Indice d'affaiblissement acoustique $TL(\theta)$
- Correction acoustique → Coefficient d'absorption $\alpha(\theta)$

COMPORTEMENT AU FEU :

- Réaction au feu
- Résistance au feu

PLANTES, CULTURES ET MATERIAUX ASSOCIES :

- Fréquence et vitesse de renouvellement de la ressource
- Plante annuelle ou vivace
- Pour 1m² de matériau isolant avec une résistance thermique précise, quelles sont :
 - La surface agricole nécessaire
 - La quantité d'eau nécessaire (croissance plante + fabrication matériaux)
 - La durée de croissance de la plante (son cycle biologique)
 - La captation de carbone (carbone biogénique)
- Est-ce que la composition et/ou la mise en œuvre du matériau inclue des matériaux non biosourcés ?
 - Si oui : Quoi ? Quantité ? Polluant ? Danger ?

4. HYPOTHESES GENERALES DE L'ETUDE

4.1. MODULES NECESSAIRES

L'évaluation des paramètres précédemment mentionnés ne peut se faire sur un module unique. En effet, si quelques caractéristiques peuvent être étudiées sur le matériau seul, la majorité requiert de travailler à l'échelle d'une paroi complète, voire d'un module fermé, en fonction du paramètre étudié et/ou du logiciel utilisé. Ces différents modules seront donc définis plus précisément en deuxième partie.

4.2. CLIMAT EXTERIEUR CONSIDERE

- **Nancy, RCP 4.5 horizon 2100**

Dans les diverses simulations de l'étude, le fichier météo considéré pour le climat extérieur est le fichier de base de Nancy modifié pour y inclure le scénario *Representative Concentration Pathways* (RCP) 4.5 du GIEC à l'horizon 2100 via le logiciel Meteonorm.

D'une part, la ville de Nancy est située dans le Grand Est et est, de plus, la ville à considérer si le procédé étudié peut être applicable à toute la France pour un climat de plaine d'après le programme PACTE [40]. Dans le cadre de cette étude, la région visée est certes le Grand Est, mais le bâti moderne est semblable sur tout le territoire et la méthode utilisée peut être appliquée au bâti ancien d'autres régions.

D'autre part, l'intégration du scénario RCP 4.5 du GIEC permet une prise en compte de potentiels effets du réchauffement climatique. Il décrit l'évolution des concentrations de GES entre 2006 et 2300, en considérant une stabilisation de ces émissions à partir de 2040 [41]. Cette hypothèse reste ainsi relativement optimiste en comparaison avec les scénarios 6.6 voire 8.5 (cf. *Annexe 5*).

Voici les courbes d'évolution de la température et de l'humidité relative extérieures de ce climat :

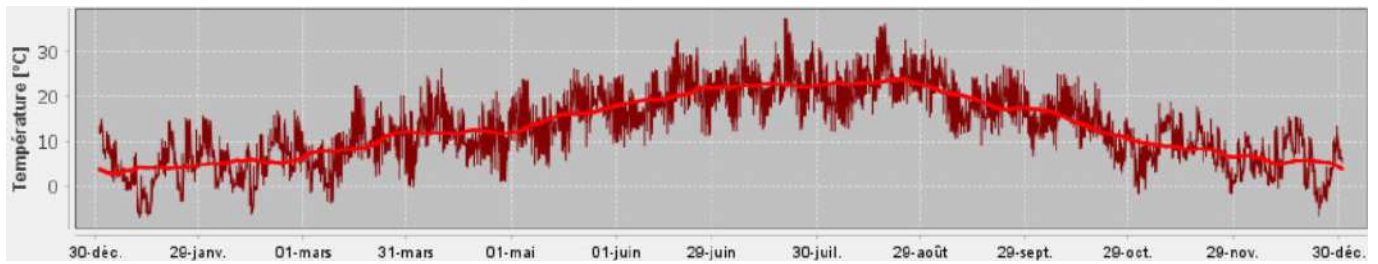


Figure 6 – Fichier météo Nancy, RCP 4.5 horizon 2100 : Courbe d'évolution de la température extérieure

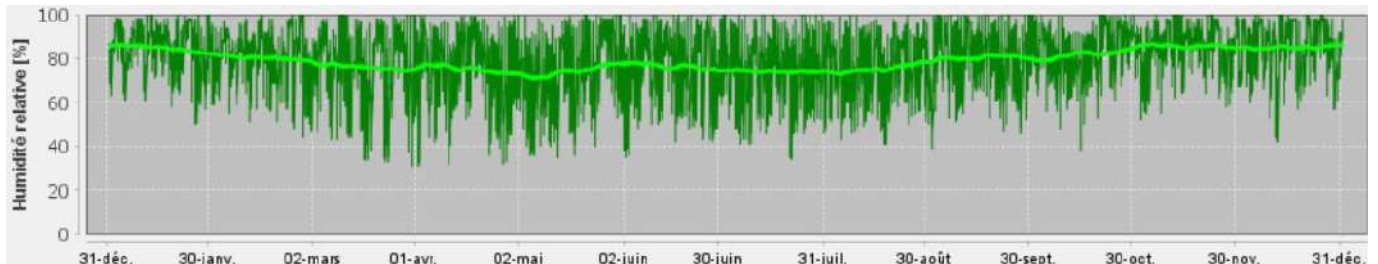


Figure 7 – Fichier météo Nancy, RCP 4.5 horizon 2100 : Courbe d'évolution de l'humidité relative extérieure

4.3. LOGICIELS UTILISES

TABLEUR DE CALCUL :

- **Microsoft Excel 365 – Licence INSA Strasbourg**

SIMULATIONS THERMIQUES :

- **Pleiades, Version 6.24.1.2 – Licence INSA Strasbourg**

Pleiades (www.izuba.fr) est un logiciel d'IZUBA pour l'écoconception de bâtiments qui propose des modules divers. Dans le cadre de cette étude, ce sont ces modules de Simulation Thermique Dynamique (STD) et AMAPOLA qui seront exploités. D'une part, le module STD permet de simuler le comportement thermique d'un bâtiment en tenant compte de divers phénomènes physiques (apports solaires, échanges au travers des parois, circulation de l'air, inertie thermique, action des occupants, etc.) et d'évaluer les besoins de chauffages et l'inconfort thermique estival du bâti. D'autre part, le module AMAPOLA permet, entre autres, de déterminer la solution la plus optimisée parmi plusieurs options et de déterminer la fiabilité des résultats.

SIMULATIONS HYGROTHERMIQUES :

- **WUFI® Pro, Version 6.7 et WUFI® 2D, Version 4.5 – Licences étudiantes**

WUFI® (wufi.de) est une famille de logiciels du Fraunhofer IBP qui permet le calcul dynamique à une (1D) ou deux dimensions (2D) de la chaleur et de l'humidité dans les parois multicouches. Le logiciel WUFI® Pro est le programme standard pour l'évaluation en 1D des conditions d'humidité dans l'enveloppe des bâtiments. Il effectue des calculs hygrothermiques sur des coupes transversales de parois, en tenant compte de l'humidité intégrée, de la pluie battante, du rayonnement solaire, du rayonnement à ondes longues, du transport capillaire et de la condensation estivale. De son côté, le logiciel WUFI® 2D étend le champ d'application à l'analyse 2D, nécessaire si les régions voisines de la section étudiée ont des réactions différentes à la chaleur et à l'humidité. Les données d'entrée de ce logiciel sont cependant bien plus complexes et le temps de calcul considérablement plus long. Il est donc recommandé de conserver l'analyse 1D, et de considérer l'analyse 2D en complément. Par ailleurs, le type de calculs réalisés par WUFI® est exigé par la norme EN 15026.

- **Ubakus, Version en ligne février 2024 – Compte étudiant**

Ubakus (ubakus.de) est un site internet créé par l'ingénieur Ralf Plag, qui permet notamment de calculer le coefficient U et d'obtenir des informations dont les éventuels problèmes d'humidité d'une paroi. Cependant, le site utilise pour ce faire la méthode de Glaser, une méthode statique qui évalue, à un pas de temps mensuel, la quantité d'eau condensée par point de rosée en hiver et le potentiel de séchage de la paroi en été. Ainsi, la méthode considère qu'une paroi est saine si son potentiel de séchage est supérieur à la quantité de condensats, et ne prend

donc pas en compte les transferts d'humidité rapides au sein des parois [42] et les impacts de l'humidité intégrée, de la pluie battante, des rayonnements, du transport capillaire et de la condensation estivale.

Puisque Ubakus est à ce jour encore très utilisé pour l'évaluation du comportement hydrique, un exemple permettra de comparer ses résultats à ceux de WUFI® sera présenté en deuxième partie.

4.4. PREREQUIS DE L'ETUDE

L'étude menée en deuxième partie ainsi que les résultats présentés sont indissociables de certains principes, tels que la bonne prise en compte de l'humidité dans les parois, la mise en place d'un système de ventilation performant, la bonne conception relative à l'étanchéité à l'air, aux ponts thermiques et au feu, la classe d'emploi du bois si celui-ci est utilisé, etc. Tous ces points ne sont pas traités directement dans l'étude, mais des sources fiables sont répertoriées en *Annexe 6*. Aussi, il est indispensable de faire appel à des professionnel·le·s et de toujours effectuer un diagnostic préalable du bâti existant, notamment pour le bâti ancien, avant d'effectuer des travaux d'isolation.

En outre, les matériaux géosourcés ne possédant pas de définitions officielles, il est considéré qu'il s'agit de produits d'origine minérale peu ou pas transformé tels que la terre ou la pierre sèche.

DEUXIEME PARTIE – ETUDE DES SOLUTIONS RETENUES

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.1. PROPRIETES HYDRIQUES

1.1.1. RESISTANCE A LA DIFFUSION DE VAPEUR D'EAU

La migration de vapeur d'eau à travers les parois extérieures des bâtiments est une des sources d'humidité principales, dont la prise en compte est nécessaire pour éviter tout risque de condensation de vapeur au sein de la paroi ; la présence d'eau liquide persistante peut en effet altérer, voire faire pourrir des matériaux, détériorant leurs performances hygrothermiques, et l'apparition de moisissures peut contaminer l'air intérieur. Ce phénomène résulte de la différence de pression partielle de vapeur qui s'exerce sur une paroi entre les ambiances intérieure et extérieure. Il s'opère toujours de l'ambiance avec la plus grande pression vers l'ambiance avec la plus faible, et varie ainsi en fonction du climat, de la saison, des sources d'humidité, etc. Pour assurer la pérennité de l'enveloppe bâtie, trois grands principes sont à respecter : renouveler l'air intérieur en continu via un système de ventilation, penser la composition des parois en tenant compte du comportement à la vapeur d'eau des matériaux et assurer l'étanchéité à l'air et la gestion de la pénétration de vapeur d'eau de l'enveloppe. Ce projet s'intéresse spécifiquement aux deux derniers principes.

COMPORTEMENT A LA VAPEUR DES MATERIAUX :

Les matériaux de construction sont qualifiés selon leur ouverture / fermeture ou selon leur résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Cette résistance est évaluée par deux grandeurs :

- **Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ :**

Il traduit la capacité d'un matériau à laisser passer la vapeur d'eau. Plus il est faible, moins le matériau est résistant à la diffusion de vapeur d'eau et donc plus il est ouvert. Cette propriété, sans unité, est évaluée comparativement à la valeur de référence pour l'air, avec $\mu_{air} = 1$ [43]. Elle est indiquée directement dans les données du matériau, considéré à l'état sec ; par convention, cet état est défini comme l'état du matériau séché à $70\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ avec de l'air pris dans une ambiance de température $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et d'humidité relative $50 \pm 5\%$ [44]. En réalité, il faut distinguer ses valeurs sèche μ_{sec} et humide μ_{humide} , car il dépend plus ou moins du taux d'humidité du matériau. Cette dépendance est directement estimée par des logiciels comme WUFI®.

- **Lame d'air équivalente S_d :**

L'épaisseur de matériau mise en œuvre a un impact direct sur son comportement à la vapeur d'eau. Ainsi, la grandeur qui détermine sa résistance est la lame d'air équivalente dont la formule est [45] :

$$S_d = e \cdot \mu \quad [\text{m}]$$

Avec e l'épaisseur du matériau [m]

La valeur S_d obtenue indique l'épaisseur d'air immobile ayant la même résistance à la diffusion de vapeur d'eau que l'épaisseur du matériau considérée. Plus sa valeur est élevée, plus le matériau est résistant. Voici les paliers considérés dans cette étude :

Tableau 1 – Paliers de détermination de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau via S_d

| VALEUR DE S_d [m] | RESISTANCE A LA DIFFUSION DE VAPEUR D'EAU |
|------------------------|--|
| $S_d \leq 1$ | Très faible |
| $1 < S_d \leq 10$ | Faible |
| $10 < S_d \leq 100$ | Forte |
| $100 < S_d \leq 1500$ | Très forte |
| $1500 < S_d$ | Imperméable |

Note 1 : Les valeurs de ce tableau sont issues de la confrontation des sources [31], [32], [43], [46] et [47].

Note 2 : Les isolants considérés dans cette étude ont des S_d « très faible » ou « faible ». Or un isolant avec un S_d de 2 n'a pas le même effet sur la résistance à la diffusion à la vapeur d'eau qu'un isolant avec un S_d de 10 alors qu'ils sont dans la même catégorie de S_d . Il est donc important de nuancer les conclusions et les comparaisons sur ce type de matériau.

ETANCHEITE A L'AIR ET GESTION DE LA PENETRATION DE VAPEUR D'EAU :

Ces deux fonctions sont assurées par une unique membrane. Il peut s'agir d'une :

1. Pare-vapeur très résistant à la diffusion de vapeur d'eau avec $S_d \geq 18$ m (cf. DTU 31.2) ;
2. Freine-vapeur moins résistant avec $1,5 \leq S_d \leq 5$ m et respectant la règle du « facteur 5 », selon laquelle le parement extérieur doit être 5 fois plus ouvert que le parement intérieur : $S_{d\ int} \geq 5 \cdot S_{d\ ext}$ (cf. DTU 31.2) ;
3. Membrane hygrovariable dont le S_d varie en fonction du sens du flux de vapeur d'eau dans la paroi.

D'après les préconisations de plusieurs rapports, études et expertises ([31], [33], [43] et [48]), la solution 3 est retenue et utilisée dans cette étude.

1.1.2. HYGROSCOPICITE

L'hygroscopicité d'un matériau désigne sa capacité à stocker puis déstocker de l'eau dans ses pores en fonction du taux d'Humidité Relative (HR) de l'air, sous forme de vapeur puis d'eau liquide. Lorsque ce dernier augmente, une partie de la vapeur d'eau qu'il contient est alors adsorbée par le matériau puis absorbée sous forme d'eau liquide dans ses pores via le phénomène de condensation capillaire. Les matériaux hygroscopiques présentent donc un intérêt notable pour le confort hygrothermique et la qualité de l'air intérieur, en réduisant les effets liés pics d'HR de l'air et les risques de condensation par saturation de vapeur d'eau au sein de la paroi [43][49]. Cette propriété est caractérisable par deux grandeurs :

- **Valeur de la capacité tampon hydrique VCTH (ou Moisture buffer value MBV) :**

Cette grandeur indique la quantité d'humidité qu'un matériau stocke ou déstocke lorsqu'il est exposé à des variations de l'HR de l'air quotidiennes entre deux niveaux donnés. Dans les faits, cette notion est difficile à appréhender, puisqu'il faut rigoureusement distinguer la $VCTH_{réelle}$, qui prend en compte la résistance de la lame d'air à la surface du matériau, de la $VCTH_{idéale}$, qui néglige cette résistance et constitue donc la limite maximale de la $VCTH_{réelle}$. La valeur idéale fait intervenir des équations multiples et complexes, tandis que la valeur réelle s'obtient expérimentalement en laboratoire d'après le protocole du projet NORDEST [50] grâce à la formule suivante [51] :

$$VCTH_{réelle} = \frac{\Delta m}{S \cdot (HR_{haute} - HR_{basse})} \quad [g \cdot m^{-2} \cdot \%HR^{-1}]$$

Avec :

Δm la variation de la masse du matériau au cours de la phase d'absorption / de désorption [g]

S la surface exposée de l'éprouvette [m²]

HR_{haute} et HR_{basse} les valeurs d'humidité relative haute et basse [%]

En outre, des valeurs de $VCTH$ n'ont pas pu être trouvées en ligne pour tous les matériaux mentionnés dans ce projet, et différentes valeurs ont parfois été trouvées pour un même matériau. Ainsi, cette grandeur ne sera mentionnée que pour certains matériaux à titre indicatif à partir des paliers suivants :

Tableau 2 – Paliers de détermination de l'hygroscopicité via VCTH

| VALEUR DE VCTH [g · m ⁻² · %HR ⁻¹] | HYGROSCOPICITE |
|--|----------------|
| $VCTH \leq 0,2$ | Négligeable |
| $0,2 < VCTH \leq 0,5$ | Limitée |
| $0,5 < VCTH \leq 1,0$ | Modérée |
| $1,0 < VCTH \leq 2,0$ | Bonne |
| $2,0 < VCTH$ | Excellente |

Note : Adapté de « Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material », par Viel, M., Collet, F., Lanos, C., 2018, p. 217, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025> [51]

- **Isotherme de sorption et teneur en eau de référence w_{80} :**

L'hygroscopicité d'un matériau peut être appréhendée par son isotherme de sorption (cf. Annexe 7), qui indique la teneur en eau du matériau en fonction de l'HR de l'air. La teneur en eau à 80 % d'HR de l'air w_{80} constitue une valeur de référence permettant de caractériser cette hygroscopicité [20][52] et sera donc utilisée dans ce projet avec les paliers suivants :

Tableau 3 – Paliers de détermination de l'hygroscopicité via w_{80}

| VALEUR DE w_{80} [kg · m ⁻³] | HYGROSCOPICITE |
|---|----------------|
| $w_{80} \approx 0$ | Nulle |
| $0 < w_{80} \leq 10$ | Faible |
| $10 < w_{80} \leq 40$ | Moyenne |
| $40 < w_{80} \leq 80$ | Forte |
| $80 < w_{80}$ | Très forte |

Note : Adapté de « Humidité dans les parois », Courgey, S. (2024, 9 janvier). [Diapositives].

1.1.3. CAPILLARITE

La capillarité est un phénomène physique, décrit par la Loi de Jurin¹, permettant l'ascension naturelle d'un liquide le long d'un tube ou d'un corps poreux, et ce, malgré la force de gravité. Pour un matériau de construction, elle est donc liée à sa porosité, mais aussi à la structuration de ses pores ; des pores semblables à des tubes fins et continus favorisent le déplacement de liquide et augmentent donc la capillarité. C'est un paramètre qu'il est important de considérer lors du choix des matériaux et de leur association au sein d'une même paroi [20][43]. Il peut être défini par trois coefficients :

- **Coefficient d'absorption de la pluie battante A_w :**

Il traduit la capacité d'absorption de l'eau de pluie battante d'un matériau, qui constitue une des principales sources d'humidité des parois depuis l'extérieur. Plus il est élevé, plus la paroi va absorber cette eau. Il est déterminé via des protocoles de mesure (cf. NF EN 722-11) et notamment via la méthode de la pipe de Karsten² (cf. NF EN 16302). Le coefficient A_w , indiqué dans les données des matériaux, s'exprime en [kg · m⁻² · s^{-0,5}] et permet de caractériser la capillarité d'un matériau [31] d'après les paliers suivants :

Tableau 4 – Paliers de détermination de la capillarité via A_w

| VALEUR DE A_w [kg · m ⁻² · s ^{-0,5}] | CAPILLARITE |
|--|---------------------------------|
| $A_w \leq 0,005$ | Extrêmement faible, voire nulle |
| $0,005 < A_w \leq 0,01$ | Très faible |
| $0,01 < A_w \leq 0,05$ | Faible |
| $0,05 < A_w \leq 0,1$ | Moyenne |
| $0,1 < A_w \leq 0,2$ | Forte |
| $0,2 < A_w$ | Très forte |

Note : Adapté de Courgey, S. (2024, 9 janvier). *Humidité dans les parois* [Diapositives] [43] et de RAGE. (2013). *Evaluation des risques de pathologies liés à l'humidité*. p. 18. Accessible à l'adresse : <https://www.proreno.fr/documents/evaluation-des-risques-de-pathologies-liees-a-l-humidite-au-niveau-des-poutres-encastree-s-dans-un-mur-exterieur-isole-par-linterieur> [53]

- **Coefficients de transport liquide par succion D_{ws} et par redistribution D_{ww} :**

Ces deux coefficients sont utilisés par le logiciel WUFI® afin d'évaluer plus finement la capillarité des matériaux. S'ils ne sont pas connus pour un matériau, le logiciel utilise la formule suivante pour le transport par succion :

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot \left(\frac{A_w}{w_f}\right)^2 \cdot 1000 \left(\frac{w}{w_f}\right)^{-1} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Avec :

w la teneur en eau du matériau [kg · m⁻³]

w_f la saturation en eau libre du matériau [kg · m⁻³]

Le logiciel indique procéder de façon similaire pour le coefficient D_{ww} mais ne précise pas la formule utilisée [54].

1.1.4. TENEUR EN EAU

La teneur en eau d'un matériau correspond à la quantité d'eau qu'il contient et est influencée par les trois paramètres précédemment énoncés, ainsi que par la quantité d'eau qu'il contient initialement. Il s'agit d'une

¹ En physique, la loi de Jurin (1717) permet de calculer la hauteur d'ascension d'un liquide dans un tube capillaire en fonction de son rayon et de l'angle de contact.

² Cette méthode est décrite dans le document suivant : <https://associationcarne.files.wordpress.com/2020/06/tutoriel-karsten.pdf>

donnée importante qu'il faut contrôler, puisqu'elle peut impacter les performances, la pérennité et l'intégrité des matériaux. En effet, en fonction de sa nature (biosourcé, manufacturé, etc.) ou encore de sa fonction (structurale, isolante, etc.), la teneur en eau du matériau est soumise à des valeurs seuil qu'il ne lui faut pas dépasser. Cette appellation générique de « teneur en eau » désigne en réalité trois grandeurs différentes, qui seront toutes utiles dans ce projet, mais qu'il faut différencier.

- **Teneur en eau volumique (ou Moisture density) M_d :**

Cette teneur correspond à la masse d'eau contenue dans un mètre cube de matériau (fraction volumique) :

$$M_d = \frac{m_{eau}}{V_{matériau}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Avec :

m_{eau} la masse de l'eau [kg]

$V_{matériau}$ le volume du matériau [m^3]

- **Teneur en eau sur base sèche W_s :**

Elle désigne la masse d'eau contenue par kilogramme de matériau sec (fraction massique) :

$$W_s = \frac{m_{eau}}{m_{matériau\ sec}} \cdot 100 \quad [\%_{bs}]$$

- **Teneur en eau sur base humide W_h :**

De la même façon, cette teneur est définie par à la masse d'eau par kilogramme de matériau humide :

$$W_h = \frac{m_{eau}}{m_{matériau\ humide}} \cdot 100 \quad [\%_{bh}]$$

Bien qu'elle soit moins utilisée dans le domaine de la construction que les deux autres teneurs, il est important de la connaître, car de nombreux humidimètres utilisés pour déterminer les teneurs en eau de matériaux (ex : bottes de paille) mesureraient en réalité la teneur en eau sur base humide et non sur base sèche [55].

- **Conversion entre les différentes formules :**

Voici les formules pour convertir ces grandeurs, utiles lors des simulations hygrothermiques [55] :

$$W_s = \frac{W_h}{1 - W_h} \quad [\%_{bs}] \qquad W_h = \frac{W_s}{1 + W_s} \quad [\%_{bh}] \qquad M_d = \frac{W_s}{100} \cdot \rho_{sec} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

1.2. PROPRIETES THERMIQUES

1.2.1. RESISTANCE A LA TRANSMISSION DE CHALEUR

Diverses grandeurs permettent de caractériser le comportement thermique d'un composant, d'un élément de bâtiment, voire d'un bâtiment entier. On retrouve notamment l'évaluation des transferts thermiques à travers une paroi via le calcul de sa résistance thermique, utilisée comme critère dans la réglementation et divers labels, et de son coefficient de transmission thermique.

- **Conductivité thermique λ :**

Elle désigne la capacité d'un matériau à transmettre de la chaleur. Plus la valeur de λ est petite, plus le matériau est isolant. Il s'agit d'une propriété intrinsèque indiquée dans les données du matériau en [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], considéré à l'état sec. Dans les faits, elle évolue plus ou moins en fonction du taux d'humidité du matériau et on distingue ainsi ses valeurs sèche λ_{sec} et utile λ_{utile} . Pour les matériaux non hygroscopiques ou ne contenant pas d'eau de fabrication, $\lambda_{utile} = \lambda_{sec}$, tandis que pour les matériaux hygroscopiques ou conservant de l'eau de fabrication, $\lambda_{utile} = \alpha \cdot \lambda_{sec}$, avec α un coefficient fixé par produit [43]. Si quelques sources indiquent des valeurs de λ_{utile} pour certains matériaux, il est difficile de trouver des informations cohérentes et pour l'ensemble des composants nécessaires dans l'étude.

Ainsi, pour tout de même considérer que $\lambda_{utile} \geq \lambda_{sec}$, les épaisseurs d'isolant déterminées à partir de leur λ_{sec} de ce projet permettent à elles seules d'atteindre la valeur minimale de résistance thermique souhaitée. En réalité, les autres composants de la paroi contribuent également à cette résistance.

- **Résistance thermique R :**

Elle représente la capacité d'une épaisseur de matériau à résister à la transmission de chaleur par conduction, et est calculée à partir de la formule suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-2}]$$

Avec e l'épaisseur du matériau [m]

Pour calculer la résistance thermique totale d'une paroi, il faut additionner les résistances de chaque matériau ainsi que des résistances superficielles intérieure et extérieure, valant par défaut $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-2}$ et $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-2}$ pour les murs [56]. En effet, les résistances thermiques des matériaux ne prennent en compte que les transferts par conduction et l'ajout des résistances superficielles permet d'inclure les effets de la convection et du rayonnement.

- **Coefficient de transmission thermique U :**

Ce coefficient exprime la conductance d'une paroi, c'est-à-dire l'intensité du flux de chaleur qui traverse un mètre carré de paroi pour une différence de température d'un degré entre les deux ambiances qui séparent cette paroi. Il correspond à l'inverse de la résistance thermique :

$$U = \frac{1}{R} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

1.2.2. INERTIE THERMIQUE

De façon générale, l'inertie thermique d'un bâtiment, d'une pièce ou d'une paroi peut être définie comme sa capacité à accumuler des calories et à les restituer plus tard en fonction des variations climatiques extérieures. Elle est notamment caractérisée par son aptitude à déphaser et amortir les variations de températures, c'est-à-dire à retarder et réduire l'apparition des pics de chaleur au sein d'un local. Elle est ainsi considérée comme un paramètre essentiel pour assurer le confort thermique des bâtiments et est directement influencée par des propriétés thermiques des matériaux. Certaines notions sont cependant à nuancer. D'une part, il faut distinguer l'inertie thermique de transmission et l'inertie thermique intérieure, ou inertie d'absorption. D'autre part, dans diverses sources (données de fabricants, rapports, études, etc.), l'inertie thermique est réduite aux seuls déphasage et amortissement de matériaux d'isolation, pour lesquels des valeurs fixes et invariables sont indiquées et avancées comme des arguments de choix ; or ces grandeurs sont plus complexes à formuler et doivent être appréhendées plus finement [57][58][59][60].

EVOLUTIONS DES TEMPERATURES EXTERIEURES ET INTERIEURES :

Ces évolutions peuvent être assimilées à des sinusoides ayant une fréquence de 24 heures ($T = 24 \text{ h}$) de la forme [59] :

$$T_x(t) = \widetilde{T}_x + \Delta T_x \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} + \varphi_x\right) \quad [\text{K}]$$

Avec :

\widetilde{T}_x , la moyenne de température [K]

ΔT_x , l'amplitude de température [K]

φ_x , la phase à l'origine [rad]

T la période d'oscillation de la sinusoides [h]

$x = i$ pour la température intérieure, et $x = e$ pour la température extérieure

Cette équation permet de mieux comprendre les formules de certaines grandeurs mentionnées par la suite.

PROPRIETES THERMIQUES DES MATERIAUX :

- **Masse volumique ρ :**

La masse volumique d'un matériau correspond au rapport de sa masse par son volume :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

- **Capacité thermique massique C :**

Il s'agit de la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un kilogramme de matériau de 1 degré. Il s'agit d'une propriété intrinsèque indiquée dans les données du matériau en $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$.

- **Diffusivité thermique a :**

La diffusivité thermique d'un matériau décrit la rapidité du déplacement de l'onde de chaleur à travers sa masse [57] :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Avec :

λ la conductivité thermique du matériau [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

ρC la capacité thermique volumique du matériau [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]

Ainsi, plus le matériau a une conductivité thermique élevée et une capacité calorique volumique faible, plus la diffusivité thermique est grande.

- **Temps de diffusion t_{dif} :**

La diffusivité thermique et l'épaisseur du matériau mis en œuvre déterminent le temps de diffusion de la chaleur en son sein [59] :

$$t_{dif} = \frac{e^2}{a} \quad [\text{s}]$$

Avec e l'épaisseur du matériau [m]

Ainsi, sur une période de temps donnée, plus la diffusivité d'un matériau est grande, plus le temps de diffusion est court et donc plus la chaleur pénètre le matériau.

- **Profondeur de pénétration de la chaleur $\delta(T)$:**

Elle désigne la profondeur de matériau à partir de laquelle l'amplitude des variations de température est réduite et dépend de la période d'oscillation T [61] :

$$\delta(T) = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\rho \cdot C \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{a \cdot T}{\pi}} \quad [\text{m}]$$

Avec T à convertir en [s]

De fait, les perturbations de température de courte durée vont pénétrer le matériau moins profondément que les perturbations ayant une durée plus longue. Aussi, on peut estimer l'inertie en calculant le ratio de l'épaisseur e de matériau utilisée sur la profondeur $\delta(T)$; si le ratio est faible, alors $e \gg \delta(T)$, ce qui indique que le matériau n'apporte pas plus d'inertie [62].

- **Effusivité thermique b :**

Elle décrit la rapidité d'absorption de chaleur d'un matériau et sa capacité à absorber puis restituer l'énergie [57] :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C} \quad [\text{W} \cdot \text{s}^{0,5} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

L'effusivité d'un matériau est d'autant plus élevée que sa conductivité thermique λ et sa capacité thermique volumique ρC sont grandes. Cela indique en effet que la chaleur peut pénétrer facilement le matériau d'une part, et que le matériau peut stocker de l'énergie sans évolution importante de sa température.

INERTIE DE TRANSMISSION :

Si on s'intéresse à l'effet des sollicitations provenant de l'extérieur (variations du climat, rayonnement solaire, etc.) subies par l'enveloppe extérieure d'un bâtiment, on parle d'inertie de transmission. Elle permet au bâtiment de s'opposer à la transmission de sollicitations entre les ambiances extérieure et intérieure via le déphasage et l'amortissement thermiques de leurs amplitudes. Elle est cependant inefficace en l'absence de variations importantes de la température extérieure et est d'autant plus efficace que ces variations sont élevées et qu'elle est couplée à une stratégie de surventilation nocturne. La propriété des matériaux la plus importante est alors la diffusivité thermique (mais aussi le temps de diffusion et la profondeur de pénétration, qui sont liés à la diffusivité) ; plus elle est faible, plus le déphasage et l'amortissement sont élevés [58][60][63].

- **Déphasage thermique $\eta(T)$:**

Il correspond au décalage temporel entre le moment où a lieu le pic de température extérieure et celui où a lieu le pic de température intérieure. Par définition, on peut l'exprimer [59] :

$$\eta(T) = t_{T_{i,max}}(T) - t_{T_{e,max}}(T) \quad [\text{h}]$$

Avec :

$t_{T_{i,max}}$ le temps auquel la température intérieure atteint son maximum [h]

$t_{T_{e,max}}$ le temps auquel la température extérieure atteint son maximum [h]

$T_{i,max}$ et $T_{e,max}$ résultantes de l'équation d'évolution des températures

Pour calculer le déphasage à l'échelle d'un matériau unique, la formule de calcul suivante est fréquemment mentionnée dans la littérature, pour une période $T = 24$ h :

$$\eta(T) = 1,38 \cdot \frac{e}{\sqrt{a}} \quad [\text{h}]$$

Avec :

e l'épaisseur du matériau [m]

a la diffusivité thermique du matériau [$\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$]

Le lien entre ces deux formules du déphasage est explicité en *Annexe 8* et permet d'aboutir à :

$$\eta(T) = \frac{e}{\delta(T)} \cdot \frac{T}{2 \cdot \pi} = 1,38 \cdot \frac{e}{\sqrt{a}} = 1,38 \cdot \sqrt{t_{dif}} \quad [\text{h}]$$

Avec :

$\delta(T)$ la profondeur de pénétration de la chaleur dans le matériau [m]

t_{dif} le temps de diffusion de l'onde de chaleur dans le matériau [s]

• **Facteur d'amortissement thermique $f(T)$ et amortissement thermique $A(T)$:**

L'amortissement thermique, caractérisé par le facteur d'amortissement, désigne l'atténuation de l'amplitude d'une sollicitation extérieure et s'exprime par définition [59] :

$$f(T) = \frac{\Delta T_i(T)}{\Delta T_e(T)} \quad [-]$$

Avec :

ΔT_i l'amplitude de la température intérieure sur la période T considérée

ΔT_e l'amplitude de la température extérieure sur la période T considérée

Plus ce facteur est faible, plus les températures intérieures sont amorties par rapport aux températures extérieures.

On a alors l'amortissement thermique $A(T)$:

$$A(T) = 1 - f(T) \quad [-]$$

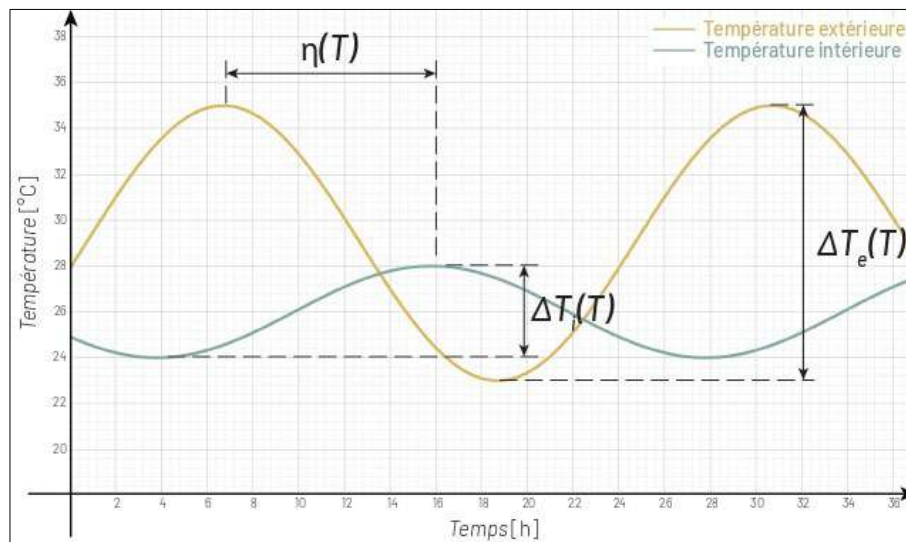


Figure 8 – Déphasage $\eta(T)$ et facteur d'amortissement f pour $T = 24$ h

Il est important de noter que dans le cas de l'inertie de transmission, on s'intéresse non pas à un matériau unique, mais à un assemblage de matériaux, sous la forme de parois multicouches, qui modifie le comportement de la paroi. Les valeurs de déphasage et de facteur d'amortissement thermiques sont alors à calculer pour l'ensemble de la paroi. Elles dépendent du nombre, du type et de l'organisation des couches de matériaux et de la période d'oscillation de la courbe de température considérée ; on distingue l'inertie quotidienne, avec $T = 24$ h, l'inertie séquentielle, avec $T = 14$ j, et l'inertie annuelle, avec $T = 1$ an [64]. De fait, se référer aux simples valeurs pour

des matériaux isolants, par exemple, ne constitue qu'une information partielle et peu exploitable. En réalité, le calcul du déphasage et de l'amortissement d'une paroi résulte de la « méthode des admittances », explicitée en Annexe 9, qui permet d'aboutir aux formules suivantes pour une période $T = 24$ h [58] :

$$\eta(T) = \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot \arg[Y] \quad [\text{h}] \qquad f(T) = \frac{|Y|}{U} \quad [-]$$

Avec :

T la période d'oscillation de la sinusoïde [h]

Y la transmittance de la paroi [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

$|Y|$ la valeur absolue de Y [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

$\arg[Y]$ l'argument mathématique de Y [rad]

U le coefficient de transmission thermique global de la paroi [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

Dans ce projet, les déphasages et facteurs d'amortissement thermiques des différentes parois étudiées seront calculés pour certaines compositions et évalués via des courbes d'évolutions de température.

INERTIE THERMIQUE INTERIEURE OU D'ABSORPTION :

Si on s'intéresse à l'effet des sollicitations provenant de l'intérieur d'un bâtiment (nombre et activité des occupants, présence d'équipements, rayonnement solaire via les vitrages, etc.), on parle d'inertie intérieure ou d'absorption. Elle représente la capacité des couches superficielles de la face interne des parois à absorber, stocker et restituer les apports instantanés de chaleur en cas de variations de la température intérieure du local, et n'a de fait aucune action sur la transmission du flux de chaleur entre les ambiances extérieure et intérieure. Elle est particulièrement efficace pour des variations de température élevées et couplée à une stratégie de surventilation nocturne. La propriété des matériaux prépondérante est alors l'effusivité thermique ; plus elle est élevée, plus elle limite les valeurs du gradient de température de l'ambiance intérieure [58].

L'étude de l'inertie intérieure est particulièrement intéressante lors de la mise en œuvre de matériaux en ITI, car les caractéristiques des isolants, et donc leur effusivité thermique, varient grandement d'un matériau à un autre. Dans ce projet, les inerties thermiques intérieures des différents complexes d'isolation seront donc caractérisées.

1.2.3. INCONFORT THERMIQUE

L'inconfort thermique d'un bâtiment est un paramètre qu'il est important de contrôler et de réduire au maximum. Deux grandeurs permettent de l'évaluer en fonction de la saison.

- **Degré-heures d'inconfort DH :**

Ils décrivent le niveau d'inconfort estival perçu par les occupants et sont exprimés en [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$]. Dans la RE2020, ils évaluent les écarts entre les températures du bâtiment et d'inconfort, considérée par convention, entre 26 et 28 $^{\circ}\text{C}$ le jour et 26 $^{\circ}\text{C}$ la nuit. Plus concrètement, les DH sont semblables à un compteur cumulant chaque degré inconfortable de chaque heure sur toute la période estivale. Ils sont évalués via les paliers suivants [65] :

Tableau 5 – Paliers de détermination de l'inconfort estival via DH

| VALEUR DE DH [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$] | INCONFORT ESTIVAL |
|---|--------------------|
| $DH \leq 350$ | Pas d'inconfort |
| $350 < DH \leq 1250$ | Inconfort possible |
| $1250 < DH$ | Inconfort excessif |

Note : Adapté de « Guide RE2020 », par le Ministère de la transition écologique, 2024, pp. 75-76, https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_re2020_version_janvier_2024.pdf [65]

- **Besoins de chauffage B_{chauf} :**

Ils décrivent l'inconfort hivernal et sont exprimés en [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$]. Plus ils sont élevés, plus le bâtiment doit être chauffé et donc plus l'inconfort thermique réel, c'est-à-dire sans recourir à un système de chauffage, est élevé.

1.3. PROPRIETES ENVIRONNEMENTALES – ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L'ACV est une méthode d'évaluation environnementale encadrée par la norme internationale ISO 14040 qui permet de quantifier les impacts d'un produit, d'un service, d'un procédé ou d'un ouvrage sur l'ensemble de

son cycle de vie. Ce dernier comprend les étapes de production (incluant l'extraction des matières premières), de construction, d'utilisation, de fin de vie et parfois de bénéfices et charges au-delà même du cycle de vie. En France, les impacts des matériaux calculés sont détaillés dans les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) individuelles ou collectives, ou à défaut dans les Données Environnementales par Défaut (DED).

1.3.1. INFORMATIONS GENERALES

NORME DES FICHES :

Toutes les FDES sont encadrées par une norme ; il s'agit de la norme NF EN 15804+A1 pour celles réalisées avant le 31/10/2022 et de la norme NF EN 15804+A2 pour celles réalisées à partir du 01/11/2022. Les principales modifications apportées par la norme A2 sont la prise en compte obligatoire du module D (bénéfices et charges au-delà du cycle de vie), le passage à 36 indicateurs (dont 6 optionnels) au lieu de 28 et la mention obligatoire de la teneur en carbone biogénique [66]. L'indicateur d'impact sur le réchauffement climatique est alors décomposé pour séparer les émissions de CO_2 équivalent fossile et biogénique. Cependant, la ligne biogénique doit être neutre, c'est-à-dire que quel que soit le scénario de fin de vie du matériau et sa capacité à stocker le carbone biogénique sur du très long terme, il est considéré comme réémis à 100% lors de l'étape de fin de vie au bout de 50 ans. Cela impacte donc fortement les FDES des produits biosourcés.

METHODE DE CALCUL :

Depuis la mise en œuvre de la RE2020, la méthode de calcul de l'ACV est passée de statique à dynamique simplifiée. La différence entre ces méthodes est le poids attribué aux émissions de GES : si l'ACV statique leur attribue un poids égal peu importe leur moment d'apparition dans le cycle, l'ACV dynamique pondère ces émissions en attribuant un poids plus faible à celles émises à la fin du cycle de vie. Ce choix est justifié par l'urgence de la situation climatique, qui impose de diminuer la quantité de GES actuelle, et par les scénarios de fin de vie, qui sont pour l'instant conventionnels et basés sur des hypothèses parfois incertaines et pouvant évoluer [67]. Pour les autres indicateurs de l'ACV, il n'y a pas de pondération.

Bien que la RE2020 concerne les bâtiments neufs, l'ACV dynamique simplifiée est utilisée dans ce projet pour estimer les impacts des divers complexes d'isolations retenus.

1.3.2. FORMULE DE CALCUL UTILISEES

INDICATEUR IMPACT SUR LA CHANGEMENT CLIMATIQUE :

Toutes les fiches des matériaux qui composent les différents complexes d'isolation ont une Durée de vie de Référence (DVR) de 50 ans ou 100 ans. Ainsi, pour tous les matériaux, les formules à utiliser pour calculer l'impact sur le changement climatique via la méthode dynamique simplifiée sont celles pour le cas $DVE \geq PER$:

- **Emissions de GES liées aux phases de production $I_p^{Production}$ et de construction $I_p^{Construction}$:**

Puisque ces émissions sont considérées émises à $t = 0$, les formules sont celles de la méthode statique [68] :

$$I_p^{production} = Q_p \cdot DE_p^{production} \quad [kgCO_2 \text{ éq}]$$

$$I_p^{construction} = Q_p \cdot DE_p^{construction} \quad [kgCO_2 \text{ éq}]$$

Avec :

Q_p la quantité initiale du composant p utilisée dans le bâtiment, en multiple de l'UF de la FDES associée

DE_p^{phase} la valeur de l'impact du composant p par UF pour la phase du cycle de vie considérée $[kgCO_2 \text{ éq}/UF]$

- **Emissions de GES liées à la phase d'exploitation $I_p^{Exploitation}$:**

Ces émissions sont considérées émises régulièrement chaque année de la PER et sont calculées via la méthode dynamique simplifiée, qui fait intervenir les coefficients de pondération [68] :

$$I_p^{exploitation} = Q_p \cdot \sum_{a=1}^{PER} \left(\frac{DE_p^{exploitation}}{DVE} \cdot f_{CO_2(t=a)} \right) = Q_p \cdot \frac{DE_p^{exploitation}}{DVE} \cdot \sum_{a=1}^{PER} (f_{CO_2(t=a)}) \quad [kgCO_2 \text{ éq}]$$

Avec :

$f_{CO_2(t=a)}$, le coefficient de pondération¹ des impacts d'une émission de GES émise à $t = a$

¹ Accessible à l'adresse : <http://www.batiment-energiecarbone.fr/projet-de-documents-methode-pour-la-reglementation-a126.html>

PER la période d'étude de référence [années], qui vaut 50 par convention

DVE la durée de vie estimée [années], égale à la DVR par convention

- **Emissions de GES liées à la phase de fin de vie $I_{C_p}^{Fin\ de\ vie}$ et au module D $I_{C_p}^{Module\ D}$:**

Ces deux phases ont lieu en dernière année et sont également calculées via la méthode dynamique [68] :

$$I_{C_p}^{phase} = Q_p \cdot DE_p^{phase} \cdot f_{CO_2(t=PER)} \quad [kg_{CO_2\ \acute{e}q}]$$

- **Emissions de GES totales $I_{C_p}^{Total}$:**

Les émissions totales correspondent à la somme des émissions de chaque phase :

$$I_{C_p}^{total} = I_p^{production} + I_p^{construction} + I_{C_p}^{exploitation} + I_{C_p}^{fin\ de\ vie} + I_{C_p}^{module\ D} \quad [kg_{CO_2\ \acute{e}q}]$$

AUTRES INDICATEURS :

Pour les autres indicateurs, la méthode statique s'applique et les divers impacts se calculent donc via la formule :

$$I_p^{total} = \sum_p I_p^{phase\ cycle\ de\ vie} = \sum_p Q_p \cdot DE_p^{phase\ cycle\ de\ vie}$$

Avec :

I_p^{total} , l'impact total dont l'unité dépend de l'indicateur mesuré

2. SPECIFICITES ET POINTS DE VIGILANCE

2.1. MURS EXISTANTS

Les bâtis anciens et modernes diffèrent du fait de leur logique de conception et leur fonctionnement global : le bâti ancien est souvent décrit comme « vivant avec son environnement », tandis que le bâti moderne en est « isolé » [69]. Cette différence est particulièrement marquée en ce qui concerne le comportement à l'eau de l'enveloppe bâti, qui est à prendre impérativement en compte lors de l'ajout d'un complexe d'isolation. En effet, l'amélioration des performances thermiques d'un bâtiment induite par un isolant s'accompagne inévitablement d'une modification de son équilibre hydrique [48].

BATI ANCIEN :

Le bâti ancien est construit à partir de matériaux naturels peu, voire pas transformés et ainsi réemployables, tels que la terre, le bois, la pierre, la paille, etc. et est ventilé naturellement via l'ouverture des fenêtres et les défauts d'étanchéité de son enveloppe [69][70]. De par les matériaux employés, il est assimilé à un système « ouvert » ; en effet, elles ne sont pas totalement étanches à l'eau et sont ainsi plus ou moins sujettes aux transports d'eau par capillarité (pluie battante en façade, remontées capillaires des eaux du sol, etc.) ou encore à la diffusion de vapeur d'eau. Une exception est cependant possible pour certaines pierres, dont le comportement pourrait être assimilé à du bâti moderne. De fait, ces parois ont besoin de sécher côté intérieur et côté extérieur pour réguler les variations de teneur en eau des matériaux, un processus autogéré par le bâti dans son état d'origine. L'ajout d'un complexe d'isolation ne doit donc pas aller à l'encontre de ce processus de séchage [48].

Il est important de noter que le diagnostic du bâti ancien est essentiel avant tout acte de rénovation. Certains bâtiments présentent en effet des défauts particuliers pouvant entraîner une humidification anormale des parois qu'il faut alors traiter. Il peut s'agir, par exemple, d'une détérioration de la toiture favorisant l'infiltration d'eau par le haut des murs ou d'une accumulation d'eau dans le sol en pied de mur. En outre, certaines rénovations doivent respecter des contraintes patrimoniales, qui empêchent la mise en œuvre d'une ITE voire interdisent de refaire les enduits en façade, même s'ils sont abîmés.

IMPORTANT : Ces diverses exceptions sont à étudier au cas par cas et ne sont donc pas considérées dans ce projet.

BATI MODERNE :

Le bâti moderne est le témoin de l'industrialisation du processus de construction mis en place pendant les périodes d'après-guerre, marquées par un manque accru de logements. Il est construit avec des matériaux industriels tels que le béton armé, le parpaing, la brique alvéolée, le polystyrène, le ciment, etc. sans tenir compte des consommations énergétiques engendrées ou du caractère réemployable des matériaux. Sa ventilation était tout d'abord naturelle, via l'ouverture des fenêtres et les défauts d'étanchéité de l'enveloppe, avant de s'artificialiser

[69][71]. A l'inverse du bâti ancien, les parois extérieures du bâti moderne sont assimilables à des systèmes « fermés » ; les matériaux ne craignent que peu, voire pas l'humidité, avec une teneur en eau qui varie peu, et les parois sont isolées des eaux souterraines et des remontées capillaires du sol. Ainsi, le bâti moderne est peu contraignant quant au choix d'un complexe d'isolation.

2.2. ISOLATION THERMIQUE

Bien qu'elles permettent toutes deux d'améliorer les performances thermiques des bâtiments, les ITE et ITI diffèrent en de nombreux points. Il est important de saisir leurs spécificités et points de vigilances.

ISOLATION THERMIQUE PAR L'EXTERIEUR :

• **Avantages et inconvénients de l'ITE :**

L'ITE est une technique d'isolation qui présente de nombreux avantages :

- Le mur conserve sa chaleur en hiver, il y a donc moins de risques de condensation par point de rosée ;
- Elle est idéale pour tirer profit de l'inertie de transmission du mur et favorise ainsi le confort d'été ;
- Elle permet de conserver les propriétés intrinsèques du mur ;
- Elle protège le mur du gel et de la pluie ;
- Elle permet de rompre les ponts thermiques au niveau des jonctions entre les murs extérieurs et les murs de refends et entre les murs extérieurs et les planchers intermédiaires ;
- Sa mise en œuvre génère moins de nuisances de mise en œuvre et n'impacte pas la surface habitable.

Cependant, le recours à une ITE n'est pas toujours possible et possède divers inconvénients :

- Elle est souvent refusée dans le cadre d'interventions sur des monuments historiques ou patrimoniaux ;
- Elle peut être interdite à cause de contraintes urbanistiques diverses, telles que le respect des limites parcellaires, spécifiées dans les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) ;
- Elle n'assure pas l'étanchéité à l'air du bâti [31] ;
- Si elle protège le mur de la condensation par point de rosée, elle déporte ce risque sur la partie froide (le plus à l'extérieur) de l'isolant, et notamment au niveau de la jonction avec le parement extérieur [43] ;
- En fonction de l'isolant, elle limite plus ou moins la capacité de séchage du mur vers l'extérieur [48].

• **Principes à respecter en ITE :**

Pour assurer la pérennité d'un bâtiment isolé par l'extérieur, il est nécessaire de :

- Respecter les prérequis précédemment mentionnés (cf. *Chapitre 1, paragraphe 4.4*) ;
- Ne pas poser une ITE sur un mur présentant une humidification anormale sans l'avoir préalablement traité ;
- Reprendre l'enduit intérieur si besoin, pour qu'il puisse assurer la bonne étanchéité à l'air ;
- Ne mettre en œuvre que des enduits extérieurs ouverts à la diffusion de vapeur d'eau et capillaires ;
- Retirer tout ou partie de l'enduit extérieur si celui-ci est en ciment et abimé.

Dans le cas du bâti ancien en système « ouvert », qui nécessite une attention particulière, il faut également :

- Ne mettre en œuvre que des isolants permettant au mur de sécher par l'extérieur ;
- Eviter voire proscrire les isolants fermés à la vapeur d'eau ;
- Mettre en œuvre des matériaux non vulnérables à l'eau et non capillaire (ex : verre cellulaire) au niveau des parties enterrées et des zones de rejaillissement (pieds de murs) [43].

ISOLATION THERMIQUE PAR L'INTERIEUR

• **Avantages et inconvénients de l'ITI :**

L'ITI ne présente que peu d'avantages en comparaison avec l'ITE :

- Elle préserve l'aspect extérieur des façades des bâtiments et constitue donc la solution privilégiée dans le cas de rénovations thermiques de monuments historiques ou patrimoniaux ;
- Elle ne pose pas de soucis d'un point de vue urbanistique et permet de respecter des contraintes de PLU.

La problématique de l'eau est une problématique spécifique de l'ITI, qui présente d'autres inconvénients :

- Elle maintient le mur froid en hiver : cela y augmente le risque de condensation par point de rosée, notamment au niveau de sa jonction avec l'isolant, et peut dégrader l'état et les performances de matériaux ;
- Elle ne protège pas le mur du gel et de la pluie [48] ;
- Elle réduit la surface habitable du logement.

- **Principes à respecter en ITI :**

Pour assurer la pérennité d'un bâtiment isolé par l'intérieur, il est nécessaire de :

- Respecter les prérequis précédemment mentionnés (cf. *Chapitre 1, paragraphe 4.4*) ;
- Ne pas poser une ITI sur un mur présentant une humidification anormale sans l'avoir préalablement traité ;
- Mettre en œuvre des matériaux qui permettent le séchage du mur côté intérieur et extérieur ;
- Poser une membrane côté intérieur, de préférence hygrovariable, pour assurer l'étanchéité à l'air et limiter les transferts de vapeur. Elle doit être fixée entre l'isolant et le parement intérieur ou respecter la règle des « 1/3 – 2/3 »¹, qui a l'avantage de préserver la pérennité de la membrane d'étanchéité ;
- Déposer les matériaux sensibles à l'eau, fermés à la diffusion de vapeur d'eau et/ou non capillaires qui se trouveraient initialement entre l'isolant et le mur (papiers-peint, etc.) ;
- Isoler les sols et plafonds ou appliquer un enduit extérieur isolant pour limiter les ponts thermiques.

Dans le cas du bâti ancien en système « ouvert », qui nécessite une attention particulière, il faut également :

- Favoriser les matériaux limitant l'entrée de vapeur dans la paroi tout en permettant son séchage si besoin ;
- Que l'enduit extérieur soit ouvert à la diffusion de vapeur d'eau et capillaire [43] ;
- Préférer des solutions capillaires pour les murs composés en majeure partie de terre ;
- Vérifier que les matériaux isolants utilisés ne soient pas trop vulnérables à l'humidité [48].

3. SOLUTIONS APPLICABLES ET ETUDIEES

3.1. DENOMINATIONS DES CAS

Pour faciliter les appellations des cas étudiés dans les diverses simulations hygrothermiques, thermiques et environnementales, voici les dénominations des murs existants :

Tableau 6 – Dénominations des murs existants

| NOM DU MUR | PERIODE | TYPE |
|--------------|---------|---|
| Mur 1 | Moderne | Mur en voile béton |
| Mur 2 | Moderne | Murs en parpaings (blocs creux) |
| Mur 3 | Moderne | Mur en briques alvéolées |
| Mur 4 | Ancien | Mur à pan de bois, remplissage torchis |
| Mur 5 | Ancien | Mur à pan de bois, remplissage en briques de terre crue |
| Mur 6 | Ancien | Mur en grès |
| Mur 7 | Ancien | Mur en pierre calcaire |
| Mur 8 | Ancien | Mur en briques de terre cuite pleines |

De plus, des études mentionnées en première partie (cf. *Première partie, paragraphe 3.1*) ont déjà effectué des simulations hygrothermiques nécessaires à ce projet et servent donc de références ; cela permet de se focaliser sur les cas manquants. Il s'agit des études *Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien* [31] et *HYGROBA : Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes* [32], complétées par les préconisations du *Guide de la rénovation de parois à l'aide de matériaux biosourcés*, écrit par le centre de ressource CODEM-Le BATLAB [10]. Le tableau ci-dessous détaille les dénominations et faisabilité des simulations :

Tableau 7 – Dénominations et faisabilité des simulations

| SOLUTION D'ISOLATION | MUR 1 | MUR 2 | MUR 3 | MUR 4 | MUR 5 | MUR 6 | MUR 7 | MUR 8 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ITE – Paille de blé | 1.1 | 2.1 | 3.1 | 4.1 | 5.1 | 6.1 | 7.1 | 8.1 |
| ITE – Fibre de bois | 1.2 | 2.2 | 3.2 | 4.2 | 5.2 | 6.2 | 7.2 | 8.2 |
| ITE – Polystyrène | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 | 5.3 | 6.3 | 7.3 | 8.3 |
| ITI – Laine de bois | 1.4 | 2.4 | 3.4 | 4.4 | 5.4 | 6.4 | 7.4 | 8.4 |
| ITI – Laine de chanvre | 1.5 | 2.5 | 3.5 | 4.5 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 8.5 |
| ITI – Laine de mouton | 1.6 | 2.6 | 3.6 | 4.6 | 5.6 | 6.6 | 7.6 | 8.6 |
| ITI – Ouate de cellulose | 1.7 | 2.7 | 3.7 | 4.7 | 5.7 | 6.7 | 7.7 | 8.7 |
| ITI – Laine de coton | 1.8 | 2.8 | 3.8 | 4.8 | 5.8 | 6.8 | 7.8 | 8.8 |
| ITI – Béton de chanvre-chaux | 1.9 | 2.9 | 3.9 | 4.9 | 5.9 | 6.9 | 7.9 | 8.9 |
| ITI – Béton de chanvre-terre | 1.10 | 2.10 | 3.10 | 4.10 | 5.10 | 6.10 | 7.10 | 8.10 |
| ITI – Laine de roche | 1.11 | 2.11 | 3.11 | 4.11 | 5.11 | 6.11 | 7.11 | 8.11 |
| ITI – Laine de verre | 1.12 | 2.12 | 3.12 | 4.12 | 5.12 | 6.12 | 7.12 | 8.12 |

¹ On peut décomposer une couche d'isolant a en deux couches $a.1$ et $a.2$ et placer la membrane vapeur entre elles. Il faut que la résistance thermique de $a.1$ (côté mur de structure) soit égale à 2/3 de celle de a .

Cas x.y = Solutions adaptées

Cas x.y = Solutions adaptées mais moins favorables

Cas x.y = Solutions non adaptées

Cas x.y = Solutions adaptées mais plus ou moins favorables en fonction de la source

Cas x.y = Simulations hygrothermiques à effectuer sur WUFI®

Cas x.y = Simulations hygrothermiques non faisables (manque de données)

Tous les cas décrit dans le *Tableau 7*, excepté ceux « non adaptés », seront étudiés via simulations thermiques. Enfin, les performances environnementales des douze complexes d'isolations seront calculées et comparées.

3.2. COMPOSITION DES PAROIS

La confrontation de diverses sources précédemment citées (cf. *Partie 1, paragraphe 3.1*) a permis d'aboutir aux compositions de parois existantes suivantes, indiquées de l'extérieur vers l'intérieur :

Tableau 8 – Compositions des parois existantes considérées

| MUR 1 | | MUR 2 | | MUR 3 | | MUR 4 | |
|-----------------------|-----------|---------------|-----------|-------------------|-----------|-----------------|-----------|
| Enduit ciment | e = 2 cm | Enduit ciment | e = 2 cm | Enduit ciment | e = 2 cm | Enduit chaux | e = 2 cm |
| Voile béton | e = 20 cm | Parpaings | e = 20 cm | Briques alvéolées | e = 20 cm | Bois, torchis | e = 15 cm |
| Enduit plâtre | e = 2 cm | Enduit plâtre | e = 2 cm | Enduit plâtre | e = 2 cm | Enduit plâtre | e = 2 cm |
| MUR 5 | | MUR 6 | | MUR 7 | | MUR 8 | |
| Enduit chaux | e = 2 cm | Grès | e = 55 cm | Calcaire | e = 55 cm | Briques pleines | e = 40 cm |
| Bois, briques d'adobe | e = 15 cm | Enduit plâtre | e = 2 cm | Enduit plâtre | e = 2 cm | Enduit plâtre | e = 2 cm |
| Enduit plâtre | e = 2 cm | | | | | | |

De plus, les compositions des différents complexes d'isolations, de l'extérieur vers l'intérieur, ont pu être déterminées à partir des spécificités et points de vigilance à respecter :

Tableau 9 – Compositions des complexes d'isolation considérées

| ITE BOTTES DE PAILLE | | ITE FIBRE DE BOIS | | ITE POLYSTYRENE | | ITI LAINE DE BOIS | |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| Enduit chaux | 3 cm | Enduit chaux | 3 cm | Enduit plastique | 3 mm | <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> |
| Paille | 22 cm | Fibre bois | 18 cm | Polystyrène | 17 cm | Laine bois + OB | 14,5 cm |
| <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> | <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> | <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> | Membrane | 1 mm |
| | | | | | | Lame d'air + T | 3 cm |
| | | | | | | Fermacell | 1,25 cm |
| | | | | | | Enduit plâtre | 1 mm |
| ITI LAINE DE CHANVRE | | ITI LAINE DE MOUTON | | ITI OUATE DE CELLULOSE | | ITI LAINE DE COTON | |
| <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> | <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> | <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> | <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> |
| Laine chanvre + OB | 14 cm | Laine mouton + OB | 14,5 cm | Ouate + OB | 16 cm | Laine coton + OB | 14,5 cm |
| Membrane | 1 mm | Membrane | 1 mm | Membrane | 1 mm | Membrane | 1 mm |
| Lame d'air + T | 3 cm | Lame d'air + T | 3 cm | Lame d'air + T | 3 cm | Lame d'air + T | 3 cm |
| Fermacell | 1,25 cm | Fermacell | 1,25 cm | Fermacell | 1,25 cm | Fermacell | 1,25 cm |
| Enduit plâtre | 1 mm | Enduit plâtre | 1 mm | Enduit plâtre | 1 mm | Enduit plâtre | 1 mm |
| ITI BETON DE CHANVRE-CHAUX | | ITI BETON DE CHANVRE-TERRE | | ITI LAINE DE ROCHE | | ITI LAINE DE VERRE | |
| <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> | <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> | <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> | <i>Paroi existante</i> | <i>e variable</i> |
| Béton de chanvre | 30 cm | Béton de chanvre | 33 cm | Laine roche | 13 cm | Laine verre | 12 cm |
| Enduit terre | 8 mm | Enduit terre | 8 mm | Membrane | 1 mm | Membrane | 1 mm |
| | | | | Lame d'air + OM | 5 cm | Lame d'air + OM | 5 cm |
| | | | | Plaque BA13 | 8 mm | Plaque BA13 | 8 mm |
| | | | | Peinture | | | |

OB = Ossature bois

OM = Ossature métallique

T = Tasseaux

Il est considéré que le mortier utilisé pour mettre en œuvre les parpaings et briques alvéolées est un mortier au ciment, tandis que celui utilisé pour le grès, le calcaire et les briques de terre cuite pleines est à la chaux.

3.3. PROPRIETES PRINCIPALES CONSIDEREES

Le tableau ci-dessous récapitule les propriétés considérées pour les matériaux de l'étude. La majorité des données sont extraites de données fabricants et des bases de données disponibles sur les logiciels WUFI®. Les sources principales y sont légendées tandis que l'ensemble des sources utilisées sont listées en *Annexe 10. D*

Tableau 10 – Propriétés des matériaux considérées

| MATERIAU | λ [W · m ⁻¹ · K ⁻¹] | ρ [kg · m ⁻³] | C_p [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹] | μ [–] | S_d [m] | RESISTANCE A LA VAPEUR D'EAU | A_w [kg · m ⁻² · s ^{-0,5}] | CAPILLARITE | W_{80} [kg · m ⁻³] | HYGROSCOPICITE |
|------------------------|---|-----------------------------------|--|--------------|--------------|---------------------------------|--|-------------|-------------------------------------|--------------------|
| Voile béton | 1,6 | 2300 | 850 | 180 | 36 | Forte | 0,0067 | Très faible | 85 | Forte |
| Parpaings | 0,6 | 1900 | 850 | 10 | 2 | Faible | 0,11 | Forte | 18 | Moyenne |
| Briques alvéolées | 0,13 | 650 | 850 | 15 | 3 | Faible | 0,097 | Moyenne | 15 | Moyenne |
| Mortier ciment | 0,608 | 1436 | 850 | 25 | 5 | Faible | 0,000667 | Nulle | 19 | Moyenne |
| Bois (chêne radial) | 0,13 | 685 | 1400 | 140 | 21 | Forte | 0,0017 | Nulle | 115 | Très forte |
| Torchis | 0,4 | 1036 | 1000 | 7,1 | 1,065 | Faible | 0,11167 | Forte | 41,4 | Forte |
| Briques d'adobe | 0,59 | 1514 | 1000 | 11 | 1,65 | Faible | 0,0467 | Faible | 19 | Moyenne |
| Grès | 2,3 | 2150 | 850 | 32 | 17,6 | Forte | 0,05 | Faible | 3,4 | Faible |
| Calcaire | 2,25 | 2440 | 850 | 140 | 77 | Forte | 0 | Nulle | 2,5 | Faible |
| Briques cuites pleines | 0,6 | 1800 | 850 | 15 | 6 | Faible | 0,29 | Très forte | 4,5 | Faible |
| Mortier chaux | 0,7 | 1785 | 850 | 15 | 6 | Faible | 0,153 | Forte | 6,53 | Faible |
| Enduit chaux | 0,7 | 1600 | 850 | 7 | 0,21 | Très faible | 0,05 | Faible | 30 | Moyenne |
| Enduit plastique | 0,7 | 1100 | 850 | 1000 | 3 | Faible | 0,00167 | Nulle | 10 | Faible |
| Enduit ciment | 1,2 | 2000 | 850 | 25 | 0,5 | Très faible | 0,00850 | Très faible | 35 | Moyenne |
| Membrane hygro | 2,9 | 65 | 2300 | 53600 | 53,6 | Très faible à forte | 0 | Nulle | 0,44 | Nulle |
| Enduit terre | 0,65 | 1514 | 1000 | 11,3 | 0,0904 | Très faible | 0,0467 | Faible | 18,8 | Moyenne |
| Enduit plâtre | 0,276 | 906 | 850 | 5,7 | 0,114 | Très faible | 0,316 | Très forte | 1,8 | Faible |
| Fermacell | 0,32 | 1150 | 1200 | 13 | 0,163 | Très faible | Sans info | Forte | 15,8 | Moyenne |
| Plaque BA13 | 0,1925 | 732 | 1384 | 6,8 | 0,085 | Très faible | 0,13 | Forte | 8,3 | Faible |
| Peinture | 0,2 | 1200 | 990 | 10 | 0,01 | Très faible | Sans info | Nulle | 0,00188 | Nulle |
| Paille | 0,048 | 100 | 1558 | 1,14 | 0,2508 | Très faible | 0,0155* | Faible | 12,75 | Moyenne |
| Fibre de bois | 0,038 | 110 | 2100 | 3 | 0,54 | Très faible | 0,0063 | Nulle | 16,8 | Moyenne |
| Polystyrène expansé | 0,038 | 30 | 1500 | 50 | 8,5 | Faible | 0 | Nulle | 1,79 | Faible |
| Laine de bois | 0,038 | 60 | 2100 | 2 | 0,29 | Très faible | 0,042 | Faible | 7 | Faible |
| Laine de chanvre | 0,040 | 40 | 1800 | 1,5 | 0,21 | Très faible | 0,0336** | Faible | Sans info | Sans info |
| Laine de mouton | 0,03897 | 20 | 1650 | 1,8 | 0,261 | Faible | 0,000342 | Nulle | 3,34 | Faible |
| Ouate de cellulose | 0,042 | 55 | 2544 | 2 | 0,32 | Très faible | 0,56 | Très forte | 6,6 | Faible |
| Laine de coton | 0,039 | 20 | 1600 | 1,47 | 0,21315 | Très faible | Sans info | Sans info | Sans info | Sans info |
| Béton de chanvre-chaux | 0,0796 | 325 | 1600 | 4,09 | 1,227 | Faible | 0,317 | Très forte | 20,8 | Moyenne |
| Béton de chanvre-terre | 0,0893 | 319 | 1500 | 3,5 | 1,155 | Faible | Sans info | Sans info | Sans info | Sans info |
| Laine de roche | 0,035 | 36 | 1030 | 1 | 0,13 | Très faible | 0 | Nulle | 0,07 | Nulle |
| Laine de verre | 0,032 | 30 | 840 | 1 | 0,12 | Très faible | 0 | Nulle | 0,4 | Faible voire nulle |

Données fabricants / calculs

Base de données « Fraunhofer-IBP » – WUFI®

Base de données « Université Technologique de Vienne » – WUFI®

Base de données « Korean Database » – WUFI®

Base de données « North America » – WUFI®

Base de données « MASEA » – WUFI®

Base de données « MASEA » – En ligne

* https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/160527/1/Annales%20du%20b%C3%A2time%20paille_18122013.pdf** <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814006369>

4. SIMULATIONS HYGROTHERMIQUES – WUFI®

4.1. CAS SIMULES ET HYPOTHESES DES SIMULATIONS

4.1.1. CAS ET HYPOTHESES – WUFI® PRO

CAS :

Les solutions étudiées avec WUFI® Pro [72] sont celles non traitées dans les rapports de références (cf. *Tableau 7*), c'est-à-dire les ITE paille (Solutions 1.1 à 8.1), les ITI béton de chanvre-chaux (Solutions 1.9 à 8.9) et les autres complexes d'ITE et ITI sur le mur en briques alvéolées (Mur 3).

Pour les murs anciens (4 à 8), les simulations en 1D sont complétées par des simulations sur WUFI® 2D.

HYPOTHESES :

Si la composition de la paroi varie selon le cas, de nombreuses hypothèses sont fixées pour l'ensemble des simulations et sont détaillées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11 – WUFI® Pro : Hypothèses communes à toutes les simulations

| PARAMETRE | DONNEES CONSIDEREES | JUSTIFICATIONS |
|------------------------------------|---|---|
| CLIMAT EXTERIEUR | <ul style="list-style-type: none"> • Fichier météo : Station Nancy, scénario RCP 4.5 du GIEC à l'horizon 2100 | <ul style="list-style-type: none"> • Choix du fichier : Explicité en première partie (cf. <i>Chapitre 1, paragraphe 4.2</i>) |
| CLIMAT INTERIEUR | <ul style="list-style-type: none"> • Norme : ASHRAE 160 • Modifications : <ul style="list-style-type: none"> - Point de départ du chauffage : 18 °C - Nombre de chambres : 4 - Volume du bâtiment : 250 m³ - Taux : $\tau = 0,6 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ | <ul style="list-style-type: none"> • Choix de ASHRAE 160 : <ul style="list-style-type: none"> - Cette norme génère un climat intérieur en fonction du climat extérieur heure par heure - Elle permet d'atteindre une $HR_i = 70 \%$ à l'inverse des autres scénarios, ce qui la rend plus plausible - Il est possible d'y modifier des paramètres liés au projet |
| POSITION PAROI | <ul style="list-style-type: none"> • Orientation : Nord-ouest • Inclinaison : 90 ° • Hauteur : Bâtiment peu élevé, jusqu'à 10 m | <ul style="list-style-type: none"> • Orientation : <ul style="list-style-type: none"> - Elle combine les contraintes de l'orientation nord (peu, voire pas de soleil direct) et de l'ouest (plus de vent et de pluie battante) - Elle est considérée dans l'étude de référence d'Enertech • Inclinaison et hauteur : Elles sont cohérentes avec l'étude de rénovation de maisons individuelles |
| TEMPS DE SIMULATION | <ul style="list-style-type: none"> • Durée : 10 ans • Dates et heures : <ul style="list-style-type: none"> - Début : 01/10/2023 à 00:00:00 - Fin : 01/10/2038 à 00:00:00 • Pas de temps : Horaire | <ul style="list-style-type: none"> • Durée : Elle doit être de minimum 3 ans et aboutir à la stabilisation de la teneur en eau totale de la paroi • Dates et heures : La simulation doit débuter un 01/10 ou 01/12 • Pas de temps : Il est requis et permet une observation assez fine des phénomènes [40] |
| TRANSFERTS SURFACIQUES | <ul style="list-style-type: none"> • Surface extérieure : <ul style="list-style-type: none"> - Résistance thermique : Fonction du vent - Epaisseur S_d : Sans revêtement - Absorptivité CLO : 0,4 • Surface intérieure : <ul style="list-style-type: none"> - Résistance thermique : Valeur fixe - Epaisseur S_d : Sans revêtement | <ul style="list-style-type: none"> • Résistance thermique fonction du vent : Cette hypothèse est plus réaliste, car elle permet à WUFI® de calculer une résistance qui varie en fonction du climat à partir du fichier météo choisi • Absorptivité CLO : Valeur associée à un enduit clair • Epaisseurs S_d sans revêtements : Les revêtements sont indiqués directement dans les compositions des parois simulées, il ne faut donc pas les prendre en compte ici [73] |
| CONDITIONS INITIALES DES MATERIAUX | <ul style="list-style-type: none"> • Humidité initiale des matériaux : Sauf autre hypothèse nécessaire, il s'agit de la teneur en eau M_d pour une $HR_{initiale}$ de 80 %, c'est-à-dire les valeurs w_{80} des matériaux • Température initiale dans la paroi : 20 °C | <ul style="list-style-type: none"> • Humidité initiale : La valeur de 80 % permet d'étudier le comportement de la paroi à partir d'un scénario défavorable, mais plausible, en ayant des matériaux donc la teneur en eau est considérée à l'équilibre • Température initiale : Cette température est plausible et s'adapte en quelques heures aux conditions extérieures [74] |
| MAILLAGE PAROI | <ul style="list-style-type: none"> • Position des moniteurs : <ul style="list-style-type: none"> - Interfaces avec intérieur et extérieur - Interfaces entre matériaux - Centre de couches de matériaux • Finesse du maillage : Fin | <ul style="list-style-type: none"> • Moniteurs : Ces positions permettent d'observer les évolutions de température et d'HR, et donc les risques de condensations, aux interfaces entre matériaux et au cœur des matériaux • Maillage : Le maillage fin automatique est suffisamment précis pour obtenir une bonne représentation des répartitions de chaleur et d'humidité calculées à travers la paroi [75] |

Les simulations avec ITE paille impliquent cependant de prendre en compte une condition concernant l'humidité initiale de la botte de paille autre que sa teneur en eau à l'équilibre $w_{80 \text{ paille}} = 12,75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. En effet, d'après les Règles Professionnelles de la Construction en Paille, ce matériau peut être mis en œuvre si sa teneur en eau sur base sèche $W_{s \text{ paille}} \leq 20 \%_{\text{bs}}$ [76], ce qui correspond à une teneur en eau volumique maximale :

$$M_{d \text{ paille max}} = \frac{W_s \text{ paille}}{100} \cdot \rho_{\text{sec paille}} = \frac{20}{100} \cdot 100 = 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Pour que les simulations d'ITE paille soit représentatives, c'est donc cette valeur qui est considérée comme condition initiale d'humidité des bottes de paille sur WUFI®.

4.1.2. CAS ET HYPOTHESES – WUFI® 2D

CAS :

Les solutions étudiées avec WUFI® 2D [77] sont celles simulées WUFI® Pro pour les murs anciens, c'est-à-dire les ITE paille et ITI béton de chanvre-chaux.

HYPOTHESES :

Deux hypothèses ont dû être modifiées par rapport à celles de WUFI® Pro pour pouvoir effectuer les simulations :

Tableau 12 – WUFI® 2D : Hypothèses modifiées par rapport à WUFI® Pro

| PARAMETRE | DONNEES CONSIDEREES | JUSTIFICATIONS |
|---------------------|---|---|
| TEMPS DE SIMULATION | • Durée : 26304 h (3 ans) | • Réduction de la durée de simulation : Cela permet de réduire considérablement la durée de calcul |
| MAILLAGE PAROI | • Finesse du maillage : Grossier | • Changement du maillage : Cela permet également de réduire la durée de calcul |

4.2. RESULTATS ET ANALYSE

4.2.1. CRITERES A RESPECTER

Le programme PACTE définit 5 critères à vérifier lors de simulations hygrothermiques, et spécifie des conditions à respecter. De plus, divers rapports, thèses et autres sources ont été globalement consulté-e-s pour mieux cerner le fonctionnement du logiciel et cibler les données exploitables à l'issue des simulations. Les documents non cités dans le corps du rapport sont listés en *Annexe 11*.

Tableau 13 – PACTE : Critères de validation des simulations hygrothermiques

| CRITERE | EVALUATION |
|--|--|
| Cohérence et fiabilité du calcul | Faible nombre d'erreurs de convergence, égalité des balances (bilans hydriques) |
| Critère de non-accumulation d'eau | Stabilisation de la teneur en eau globale de la paroi : l'écart de teneur en eau d'une année sur l'autre ne dépasse pas 2 % |
| Absence de condensation dans la masse | $HR_{\text{matériau}} \leq 98 \%$, auquel cas le risque de condensation par point de rosée est très probable |
| Pérennité des matériaux de structure | Bois ou produits dérivés du bois : $W_s \geq 20 \%_{\text{bs}}$ pendant moins de 8 semaines consécutives par an (périodes > 1 semaine) |
| Absence de développement fongique dans les matériaux biosourcés | $W_s \geq 23 \%_{\text{bs}}$ pendant moins de 8 semaines consécutives par an (périodes > 1 semaine) |

Note : Adapté de « Guide : Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiment », PACTE. (2021). pp. 35-36. <https://www.proreno.fr/documents/determination-des-hypotheses-pour-les-simulations-de-transferts-couples-temperature-humidite-dans-les-parois-de-batiment> [40]

Concernant d'autres matériaux utilisés dans les diverses compositions de paroi, voici quelques limites à respecter pour assurer le respect des critères :

- Pour les matériaux de structure (pierres, béton, etc.), la teneur en eau doit rester inférieure à la teneur en eau pour une HR de l'air de 85 % ;
- Pour les laines minérales, la teneur en eau volumique doit rester inférieure à $4 - 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, sinon les résultats sont ininterprétables puisque la laine minérale n'est pas supposée pouvoir contenir de l'eau [78] ;
- Pour les isolants issus du recyclage (ouate de cellulose et laine de coton), le critère est similaire au bois, il ne faut pas que $W_s \geq 20 \%$ sur une période prolongée ;
- Pour le parement intérieur, la norme DIN 4108 spécifie une valeur critique de $HR \geq 80 \%$ en conditions hivernales et de $HR \geq 75 \%$ en conditions estivales ;
- Concernant la quantité maximale de condensats acceptable à la surface des matériaux, la norme DIN EN ISO 13788 conseille qu'elle ne dépasse pas $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ s'ils ne peuvent pas absorber l'humidité. La norme DIN 4108 indique quant à elle que la quantité maximale admissible à l'interface entre deux couches est de $500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ si au moins l'une d'entre elles n'est pas capillaire [79] ;

- Enfin, les valeurs limites de la paille sont explicitées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 14 – Paille : Lien entre le développement de micro-organismes et les teneurs en eau

| RISQUES DE DEVELOPPEMENT DE MICRO-ORGANISMES | TENEUR SUR BASE HUMIDE [%] | TENEUR SUR BASE SECHE [%] | TENEUR VOLUMIQUE [kg · m ⁻³] | HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR CORRESPONDANTE [%] |
|--|----------------------------|---------------------------|--|---|
| Sans risques | $W_h < 20$ | $W_s < 25$ | $M_d < 20$ | $HR_{air} < 84$ |
| Risques modérés Développement négligeable Possible sur un temps limité | $20 \leq W_h \leq 28$ | $25 \leq W_s \leq 39$ | $25 \leq M_d \leq 39$ | $84 \leq HR_{air} \leq 98$ |
| Risques élevés Développement favorisé Ne doit jamais être atteint | $28 < W_h$ | $39 < W_s$ | $39 < M_d$ | $98 < HR_{air}$ |

Note : Adapté de « Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw », WIHAN, J. (2007). [Thèse de doctorat, University of East London School of Computing and Technology]. p. 55. <https://tallerconco.org/wp-content/uploads/2017/05/Thesis-Humidity-In-Straw-Bale-Walls-Jakub-Wihan.pdf> [80]

4.2.2. RESULTATS – WUFI® PRO

Le logiciel WUFI® PRO donne accès à divers résultats. A l'issue d'une simulation, la fenêtre de résumé « Statut du calcul » donne accès aux informations suivantes :

- Nombre d'erreurs de convergence** : Il n'y a pas lieu de s'inquiéter pour un nombre faible d'erreurs par an (2 à 3 erreurs), seul un grand nombre peut être révélateur d'un problème (environ 50 erreurs), auquel cas, il faut tenter d'affiner le maillage de la paroi.
- Balances** : Les deux balances correspondent aux bilans hydriques de la paroi et doivent être égales, puisque chaque variation de la teneur en eau totale doit résulter du transfert d'humidité à travers la paroi. La balance 1 concerne la modification de la teneur en eau globale surfacique de la paroi pendant le calcul :

$$B_1 = M_d \text{ finale} - M_d \text{ initiale} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$$

La balance 2 est le bilan des transports capillaires (k_l et k_r) et sous forme de vapeur d'eau (d_l et d_r) des surfaces gauche (extérieure, notée l) et droite (intérieure, notée r) :

$$B_2 = (k_l + d_l) - (k_r + d_r) \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$$

Des valeurs négatives témoignent de la diminution de la teneur en eau de la paroi.

- Teneurs en eau globale et par matériaux** : Ces valeurs donnent une première idée du comportement des matériaux. Elles doivent diminuer au cours de la période de calcul, démontrant que le mur et les matériaux sèchent et n'accumulent donc pas d'humidité au fil des ans [81].

En outre, le logiciel fournit de nombreux graphiques, qui permettent une analyse plus fine des résultats et du comportement des matériaux :

- Teneur en eau totale** : L'analyse graphique doit témoigner de sa stabilisation.
- Teneur en eau dans la couche** : Pour chaque matériau, ce graphique permet d'observer son comportement au cours de la période de calcul : séchage après la mise en œuvre, pics du taux d'humidité (occurrence, durée et gestion de ces pics).
- Humidité relative au niveau des moniteurs** : Ces courbes permettent de connaître l'évolution de l'HR au niveau de chaque moniteur, pour évaluer le risque de condensation par point de rosée si $HR = 100 \%$.
- Isoplèthes au niveau des moniteurs** : Pour un matériau donné, chaque point de l'isoplèthe représente son état hygrothermique en surface à un temps donné. Ces courbes sont difficiles à lire et donc à exploiter, excepté pour l'isoplèthe de la surface interne, qui fait apparaître les isoplèthes à la limite LIM B I et LIM B II. Ces derniers permettent d'estimer la possibilité de croissance de moisissures dans le matériau, en fonction de l'occurrence et de la durée d'apparition de points au-delà de la courbe LIM B correspondante [82].

Dans cette sous-partie, la démarche complète d'analyse des résultats est développée et illustrée pour le cas 4.1 (pan de bois, torchis et ITE paille)¹, pour lequel deux simulations ont été réalisées : une considérant uniquement le torchis et l'autre considérant uniquement le pan de bois. Pour les autres cas, seuls les résultats des simulations sont indiqués et les détails sont explicités en *Annexe 12*.

¹ Seuls les murs du bâti ancien ont été modélisés sur WUFI® Pro et WUFI® 2D, ce qui justifie le choix de ce cas.

FENETRE DE RESUME « STATUT DU CALCUL » :

Tableau 15 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, torchis uniquement – Résultats « Fenêtre de résumé » et valeurs w_f

| | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|-------------------------|
| ERREURS DE CONVERGENCE | | 10 (sur 10 ans) | | | | |
| BALANCES | | TOTAL | DETAIL | | | |
| BALANCE 1 | [kg · m ⁻²] | - 3,39 | $M_d\ finale = 8,76$ $M_d\ initiale = 12,16$ | | | |
| BALANCE 2 | [kg · m ⁻²] | - 3,4 | $k_l = 77,32$ $d_l = -90,92$ $k_r = -0,00$ $d_r = -10,19$ | | | |
| TENEURS EN EAU | | DEBUT | FIN | MINIMALE | MAXIMALE | w_f |
| GLOBALE | [kg · m ⁻²] | 12,16 | 8,76 | 7,18 | 12,43 | / |
| ENDUIT CHAUX | [kg · m ⁻³] | 30,00 | 26,80 | 15,31 | 70,11 | 250 |
| PAILLE | [kg · m ⁻³] | 20,00 | 9,90 | 7,88 | 20,00 | 95,6 |
| ENDUIT CHAUX | [kg · m ⁻³] | 35,00 | 25,64 | 18,25 | 34,35 | 250 |
| TORCHIS | [kg · m ⁻³] | 41,40 | 34,91 | 26,63 | 41,73 | 450 |
| ENDUIT PLATRE | [kg · m ⁻³] | 2,27 | 1,48 | 0,88 | 2,27 | 310 |

Tableau 16 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 (et 5.1), pan de bois uniquement – Résultats « Fenêtre de résumé » et valeurs w_f

| | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|--------------|--|-----------------|-----------------|-------------------------|
| ERREURS DE CONVERGENCE | | 0 | | | | |
| BALANCES | | TOTAL | DETAIL | | | |
| BALANCE 1 | [kg · m ⁻²] | - 6,64 | $M_d\ finale = 15,96$ $M_d\ initiale = 22,60$ | | | |
| BALANCE 2 | [kg · m ⁻²] | - 6,64 | $k_l = 93,88$ $d_l = -99,12$ $k_r = -0,00$ $d_r = 1,4$ | | | |
| TENEURS EN EAU | | DEBUT | FIN | MINIMALE | MAXIMALE | w_f |
| GLOBALE | [kg · m ⁻²] | 22,6 | 15,96 | 14,88 | 22,89 | / |
| ENDUIT CHAUX | [kg · m ⁻³] | 30,00 | 26,68 | 15,25 | 68,57 | 250 |
| PAILLE | [kg · m ⁻³] | 20,00 | 9,70 | 7,87 | 20,00 | 95,6 |
| PAN DE BOIS | [kg · m ⁻³] | 115,00 | 86,63 | 82,94 | 115,06 | 500 |
| ENDUIT PLATRE | [kg · m ⁻³] | 2,27 | 1,49 | 0,84 | 2,27 | 310 |

- Les résultats obtenus sont fiables (peu, voire pas d’erreurs de convergence), égalité des bilans hydriques ;
- Toutes les teneurs en eau diminuent, il n’y a donc pas d’accumulation d’eau dans la paroi ;
- Les teneurs en eau maximales des torchis et pan de bois respectent les conditions limites ;
- Les teneurs en eau maximales des enduits chaux sont largement inférieures à leurs valeurs à saturation et celles de l’enduit plâtre ne dépasse pas sa teneur d’équilibre ;
- La teneur en eau maximale de la paille ne dépasse pas sa teneur en eau limite de mise en œuvre et respecte ainsi les conditions explicitées dans le *Tableau 14*.

GRAPHIQUES RAPIDES :

- Les teneurs en eau totales diminuent au cours de la simulation. Celle du torchis se stabilise après environ 1,5 an, tandis que celle du pan de bois se stabilise en fin de calcul :

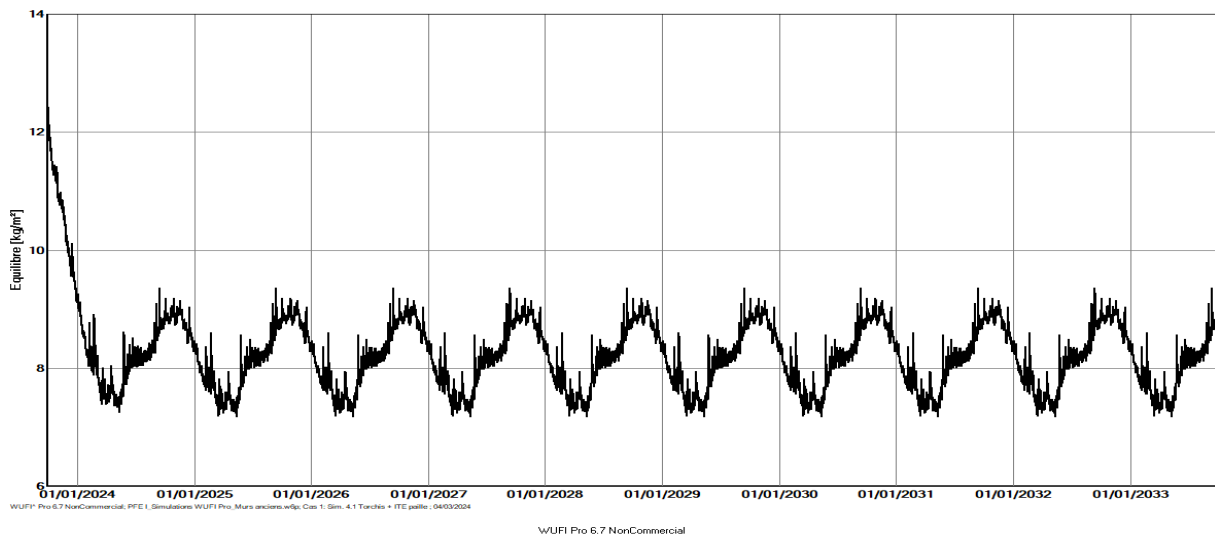


Figure 9 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, torchis – Evolution de la teneur en eau totale de la paroi [kg/m²]

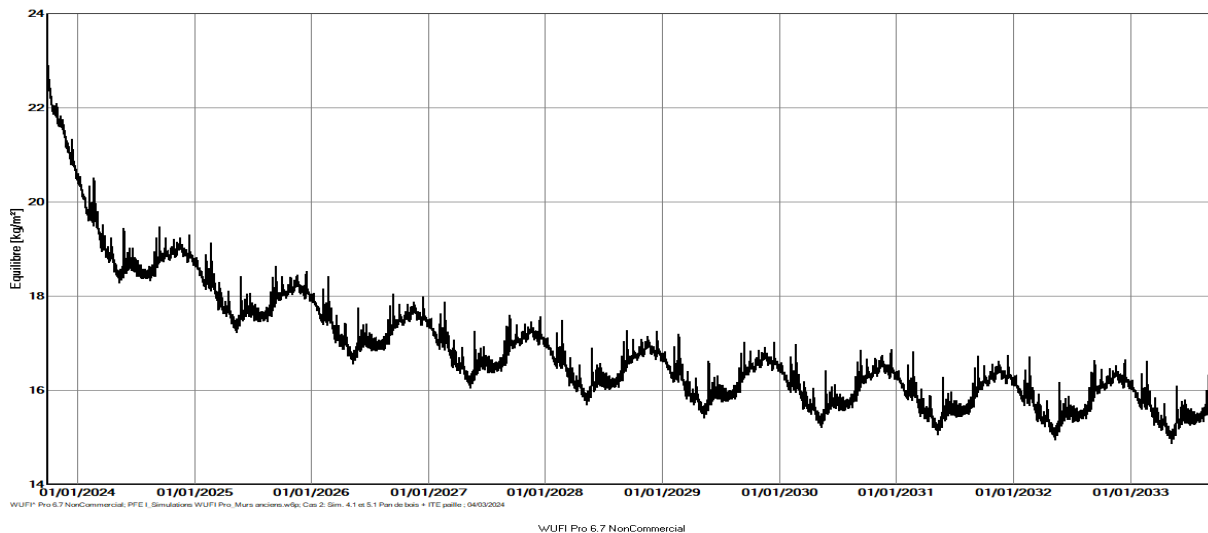


Figure 10 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, pan de bois – Evolution de la teneur en eau totale de la paroi [kg/m²]

- Les teneurs en eau du torchis et du bois diminuent et se stabilisent respectivement dans les premiers mois et à la fin de la période de calcul :

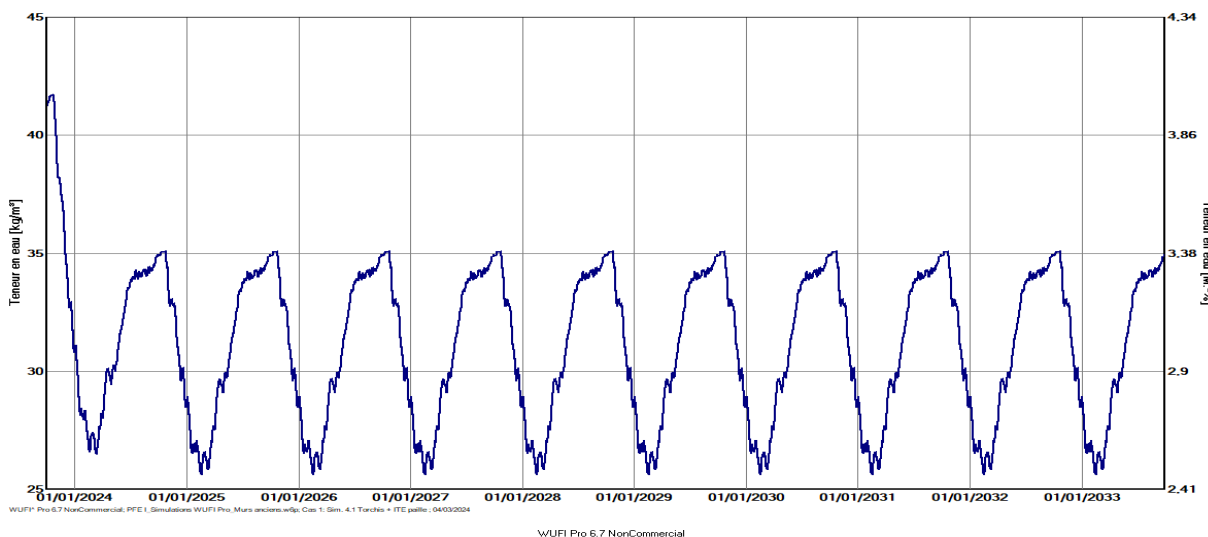


Figure 11 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, torchis – Evolution de la teneur en eau du torchis [kg/m³]

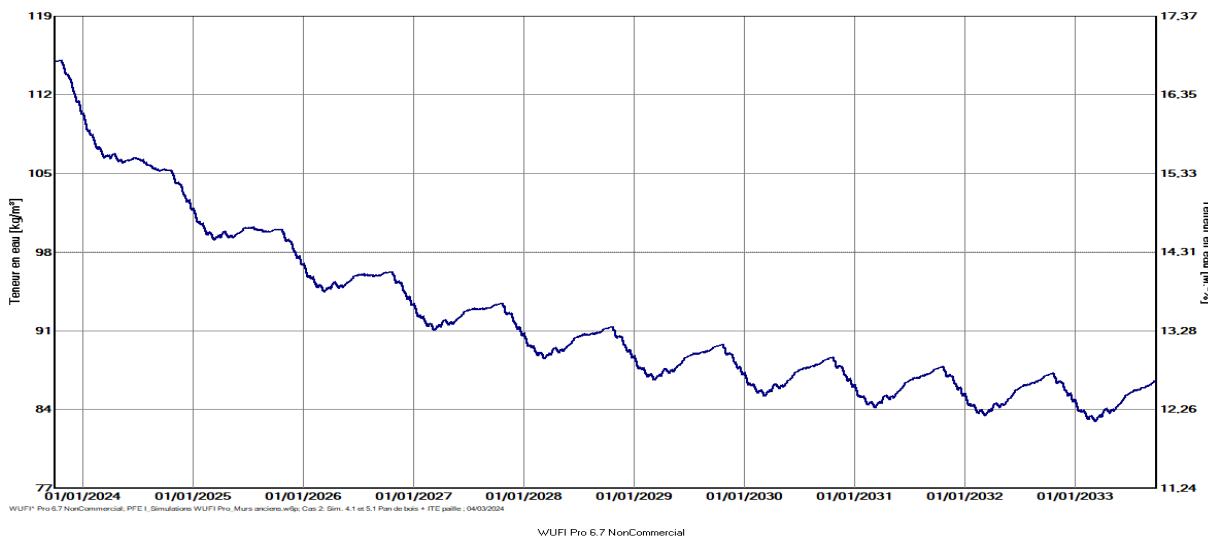


Figure 12 – WUFI® Pro : Simulation 4.1, pan de bois – Evolution de la teneur en eau du pan de bois [kg/m³]

- La teneur en eau de l'enduit chaux extérieur est stable et cohérente avec son caractère hygroscopique. Il peut réguler les fortes variations de l'HR de l'air via des pics n'excédant pas 1,5 jour :

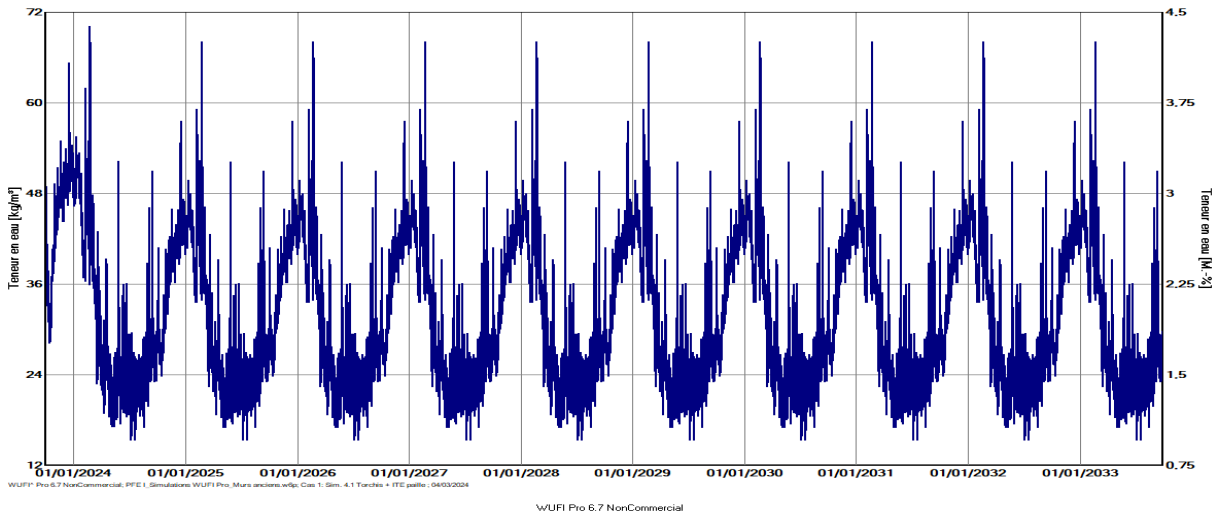


Figure 13 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau de l'enduit chaux extérieur [kg/m³]

- La teneur en eau de la paille est à son maximum au début de la simulation et diminue très rapidement pendant les premiers mois. Elle se stabilise après environ 1,5 an :

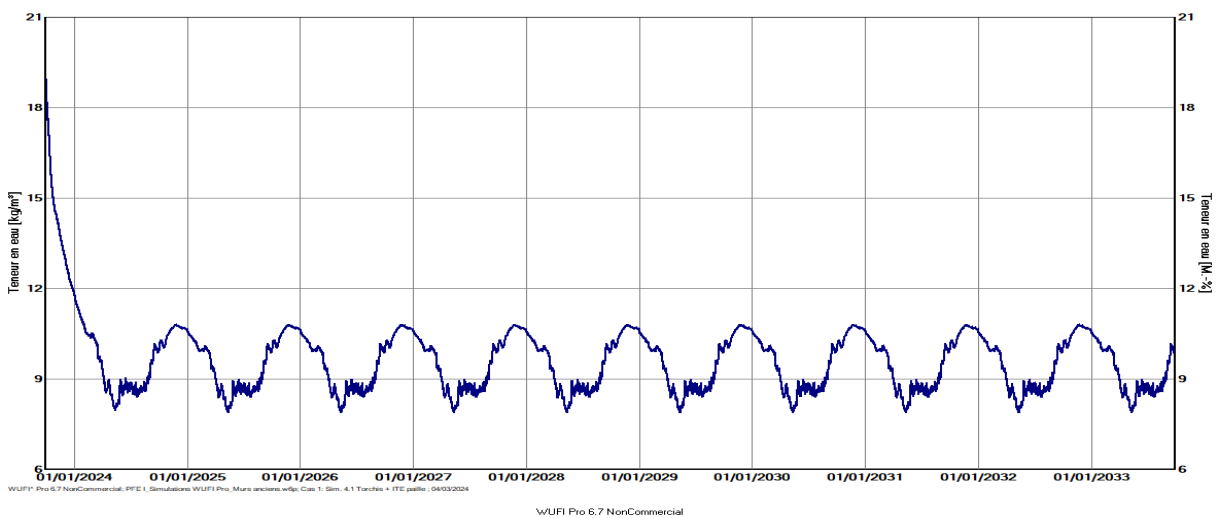


Figure 14 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau de la paille [kg/m³]

- La teneur en eau de l'enduit chaux intermédiaire diminue rapidement pour se stabiliser en quelques mois :

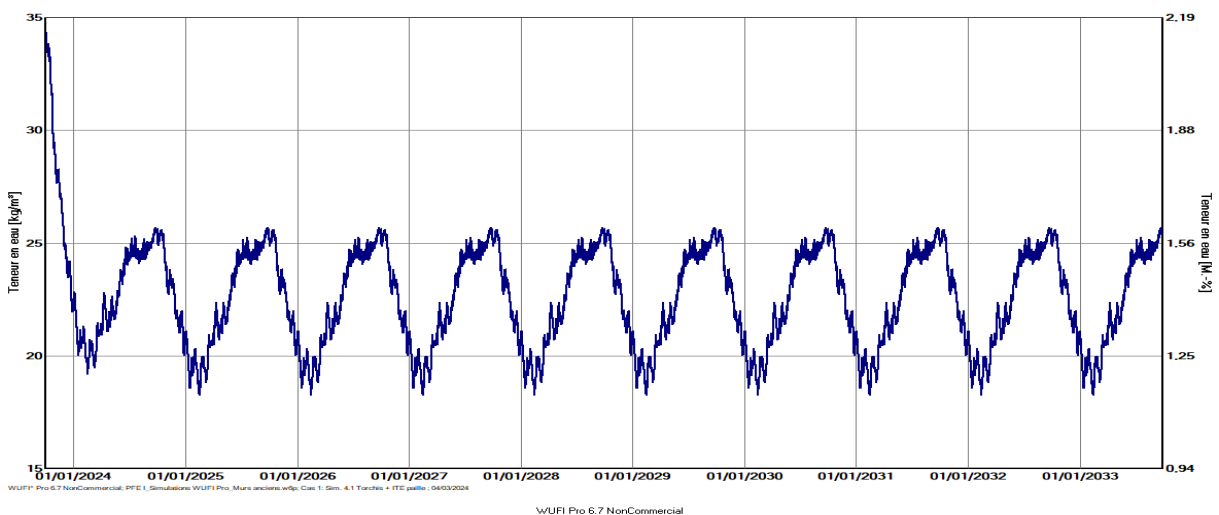


Figure 15 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau de l'enduit chaux existant [kg/m³]

- La teneur en eau de l'enduit plâtre est stable et sans pics importants. Son isoplèthe de surface montre qu'aucun point ne dépasse la courbe LIM B II, qui est l'isoplèthe à la limite à considérer pour le plâtre. Cela confirme qu'il n'y a pas de risques de moisissure dans ce matériau :

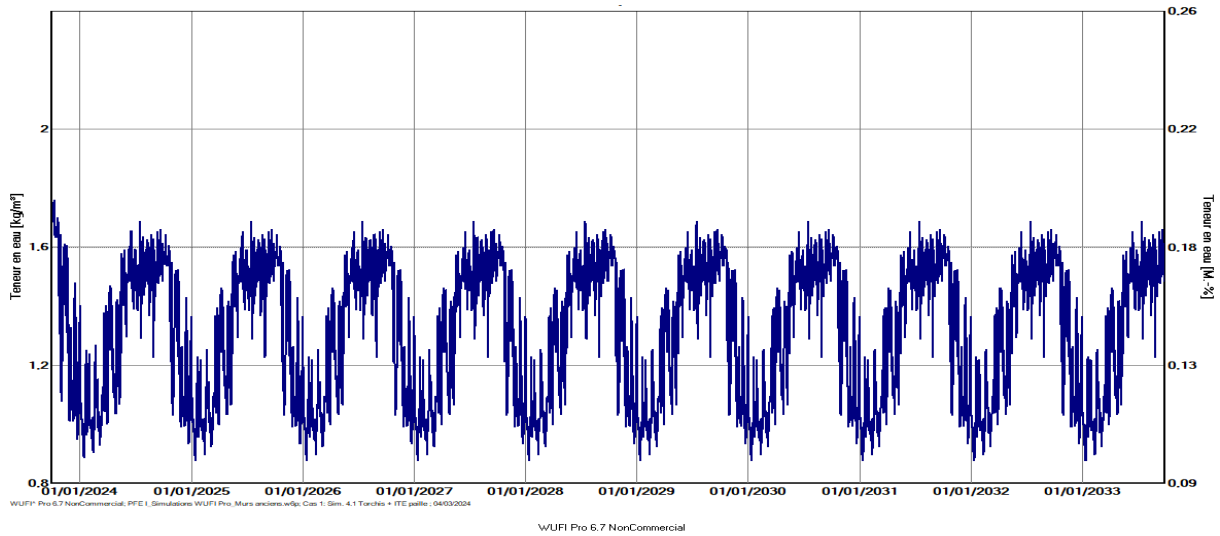


Figure 16 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau de l'enduit plâtre intérieur [kg/m³]

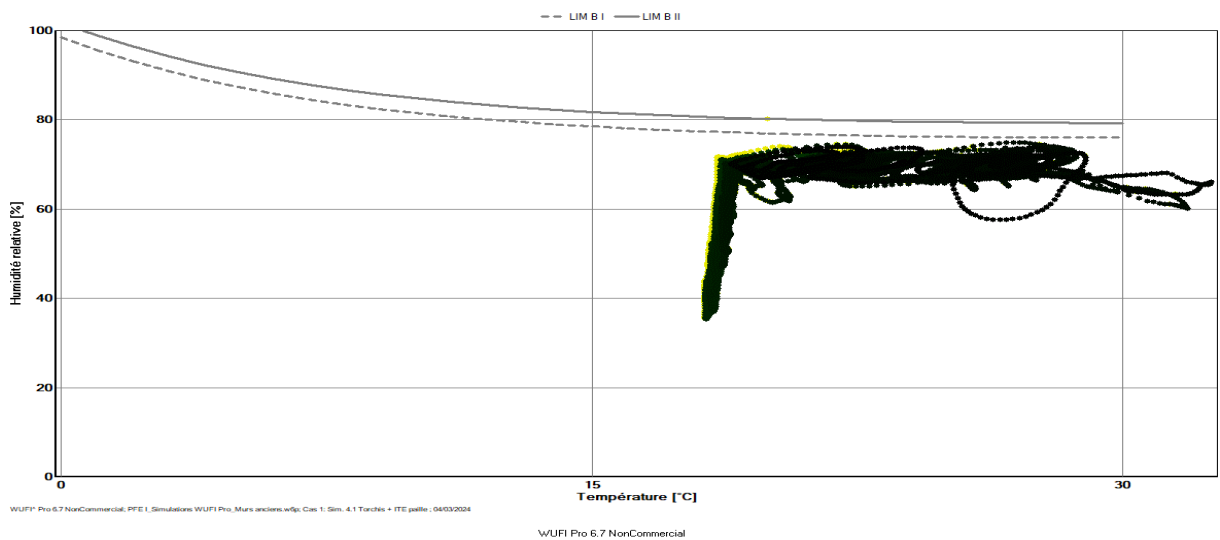


Figure 17 – WUFI® Pro : Simulation 4.1 – Isoplèthe de la surface intérieure

- Enfin, la seule courbe d'évolution de l'HR des matériaux pour laquelle la valeur maximale dépasse ponctuellement 98 % est celle de l'interface entre l'enduit chaux et l'ambiance extérieure. Cependant, le moniteur placé dans l'enduit révèle que cette valeur limite n'y est jamais atteinte. Cela signifie que de l'eau peut condenser en surface de l'enduit sans pour autant pénétrer dans le matériau.

RESULTATS POUR LES AUTRES SIMULATIONS :

Toutes les autres simulations ont abouti à des résultats favorables. Le respect des critères énoncés dans le tableau 12 sont résumés dans le tableau ci-dessous et détaillés en *Annexe 12* :

Tableau 17 – WUFI® Pro : Résumé des résultats des autres simulations

| SIMULATION | COHERENCE ET FIABILITE RESULTATS | ACCUMULATION D'EAU GLOBALE | CONDENSATION DANS LA MASSE | PERENNITE STRUCTURE | MOISSURES BIOSOURCES |
|------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|
| 1.1 | Oui (11 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation fin calcul | Non | Oui | Non |
| 2.1 | Oui (17 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 2 ans | Non | Oui | Non |
| 3.1 | Oui (10 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 2 ans | Non | Oui | Non |
| 1.9 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation fin calcul | Non | Oui | Non |

| | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|
| 2.9 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 3,5 ans | Non | Oui | Non |
| 3.9 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 4 ans | Non | Oui | Non |
| 3.2 | Oui (16 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 3 ans | Non | Oui | Non |
| 3.3 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 4 ans | Non | Oui | / |
| 3.4 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 4 ans | Non | Oui | Non |
| 3.6 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 4 ans | Non | Oui | Non |
| 3.7 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 4 ans | Non | Oui | Non |
| 3.11 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 3,5 ans | Non | Oui | / |
| 3.12 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 3,5 ans | Non | Oui | / |
| 5.1 (Sans bois) | Oui (9 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 1,5 an | Non | / | Non |
| 6.1 | Oui (10 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 1,5 an | Non | Oui | Non |
| 7.1 | Oui (8 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 2 ans | Non | Oui | Non |
| 8.1 | Oui (9 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 1,5 an | Non | Oui | Non |
| 4.9 (Sans bois) | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 2 ans | Non | / | Non |
| 5.9 (Sans bois) | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 2,5 ans | Non | / | Non |
| Pan de bois (4.9 et 5.9) | Oui (4 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation fin calcul | Non | Oui | Non |
| 6.9 | Oui (3 erreurs, balances ≈ égales) | Non Stabilisation ≈ 2,5 ans | Non | Oui | Non |
| 7.9 | Oui (11 erreurs, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 4,5 ans | Non | Oui | Non |
| 8.9 | Oui (0 erreur, balances égales) | Non Stabilisation ≈ 3 ans | Non | Oui | Non |

4.2.3. RESULTATS – WUFI® 2D

Le logiciel WUFI® 2D permet de modéliser plus finalement une paroi ou une jonction entre parois. Il indique une évaluation précise des erreurs de convergence dans l'onglet « Statistiques » et permet, à partir du logiciel lié WUFI® Graphs, d'extraire des graphiques divers (humidité relative, teneur en eau, isoplèthes, etc.) concernant une zone spécifique sélectionnée sur le maillage de la paroi.

De la même façon que dans la sous-partie précédente, la démarche complète d'analyse des résultats est ici développée et illustrée pour le cas 4.1 (pan de bois, torchis et ITE paille). Une coupe horizontale du mur en 2D a été modélisée afin d'observer le comportement des matériaux au niveau d'interfaces spécifiques. Les résultats des simulations sont indiqués et leurs analyses sont détaillées en *Annexe 12*.

STATISTIQUES :

- **Nombre d'erreurs de convergence** : 4 erreurs, les résultats obtenus sont donc fiables.

GRAPHIQUES :

- Le pan de bois (chêne radial) est un matériau très hygroscopique et très capillaire et possède une forte résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Le torchis, quant à lui, est certes hygroscopique et capillaire, mais à une faible résistance. Il est donc intéressant d'observer l'évolution de la teneur en eau sur base sèche à leur interface. Côté bois, la teneur en eau initiale est de 16,7 [%_{bs}], puis diminue en quelques mois pour ne plus dépasser les 13,5 [%_{bs}]. Côté torchis, elle passe de plus ou moins 4,1 [%_{bs}] en début de simulation à moins de 3,4 [%_{bs}]. Ainsi, les valeurs limites pour ces matériaux ne sont pas dépassées.

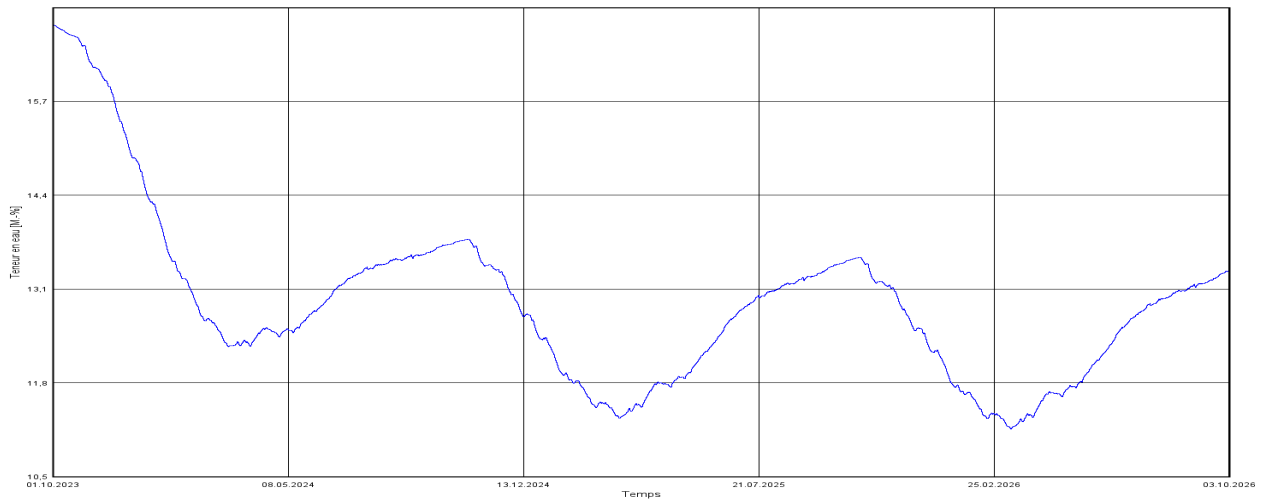


Figure 18 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l’interface bois, torchis (côté bois) [%_{bs}]

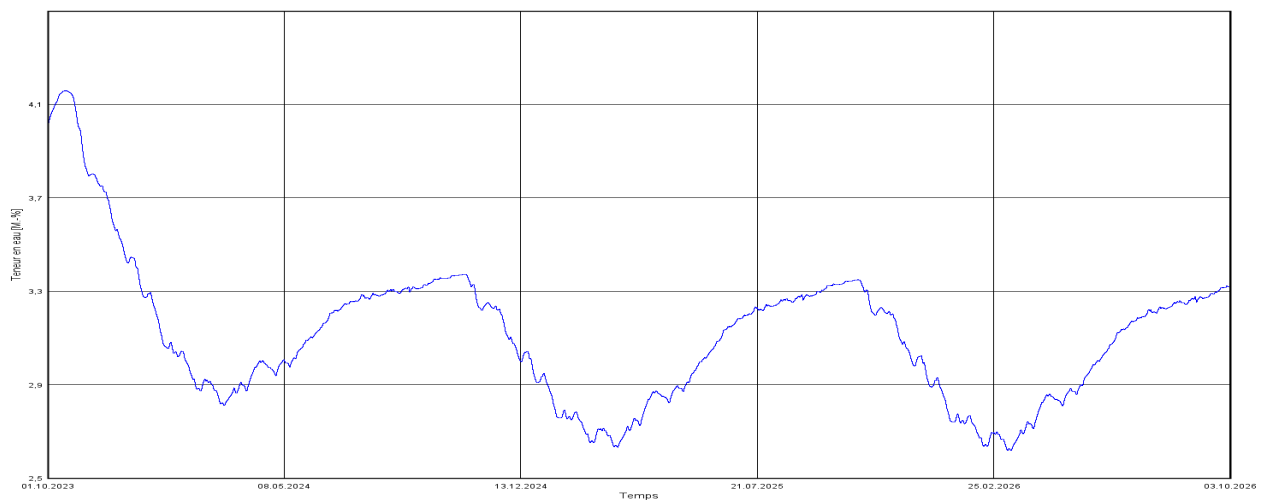


Figure 19 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l’interface bois, torchis (côté torchis) [%_{bs}]

- Le comportement à l’eau de la paille diffère également de celui du pan de bois, puisqu’elle est moyennement hygroscopique, faiblement capillaire et a une résistance très faible à la diffusion de vapeur d’eau. Ainsi, il est également important d’observer l’évolution des teneurs en eau sur base sèche à leur interface. Le bois possède une teneur en eau initiale d’environ 17,6 [%_{bs}], qui diminue sur la première année pour ne plus dépasser les 13,2 [%_{bs}]. La paille suit une évolution similaire, avec une teneur de 15,3 [%_{bs}] en début de simulation qui diminue sous les 9,8 [%_{bs}]. Les valeurs limites pour ces matériaux ne sont donc pas dépassées.

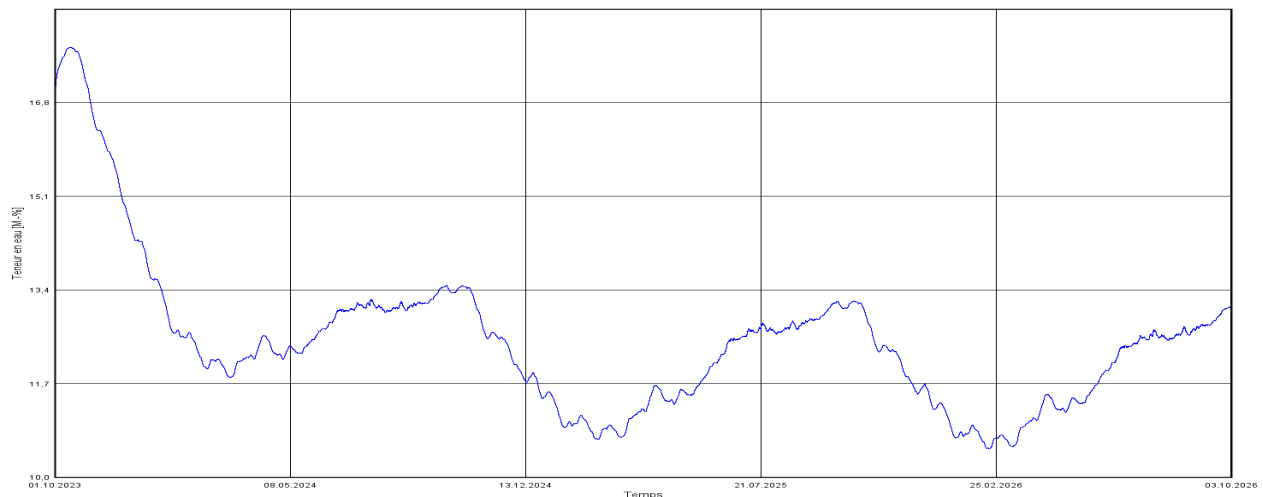


Figure 20 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l’interface bois, paille (côté bois) [%_{bs}]

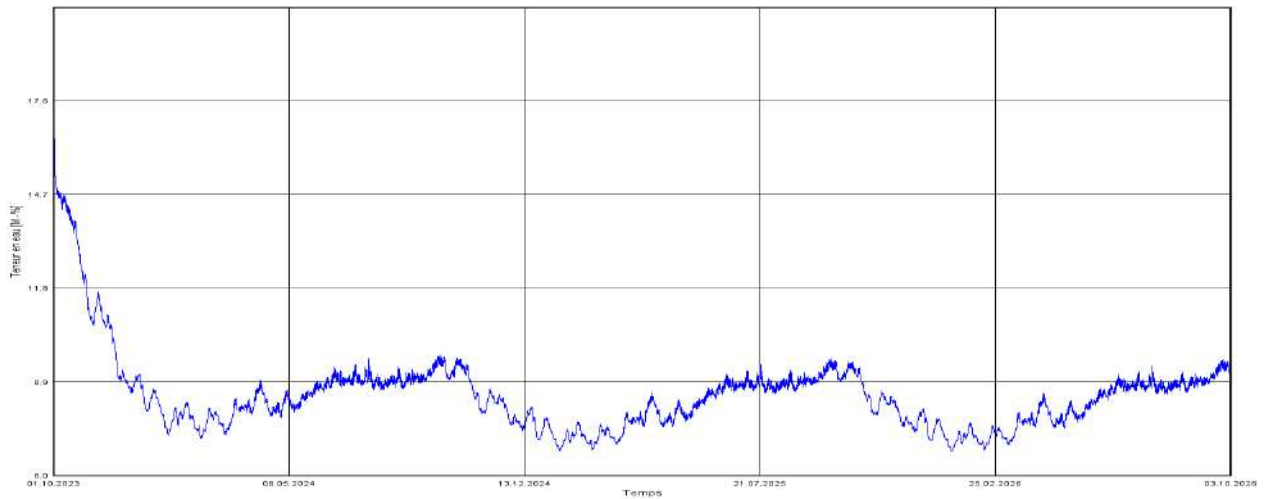


Figure 21 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l'interface bois, paille (côté paille) [%_{bs}]

- Enfin, en ITE, le principal risque de condensation par point de rosée est dans l'isolant, au niveau de son interface avec le revêtement extérieur. Cette condensation apparait si l'HR de l'air dans le matériau est de 100 %. Or, les courbes d'évolution de l'HR de l'air de la paille et de l'enduit chaux au niveau de cette interface montre que cette valeur limite n'est jamais atteinte. Côté paille et enduit, l'HR ne dépasse jamais les 93 %.

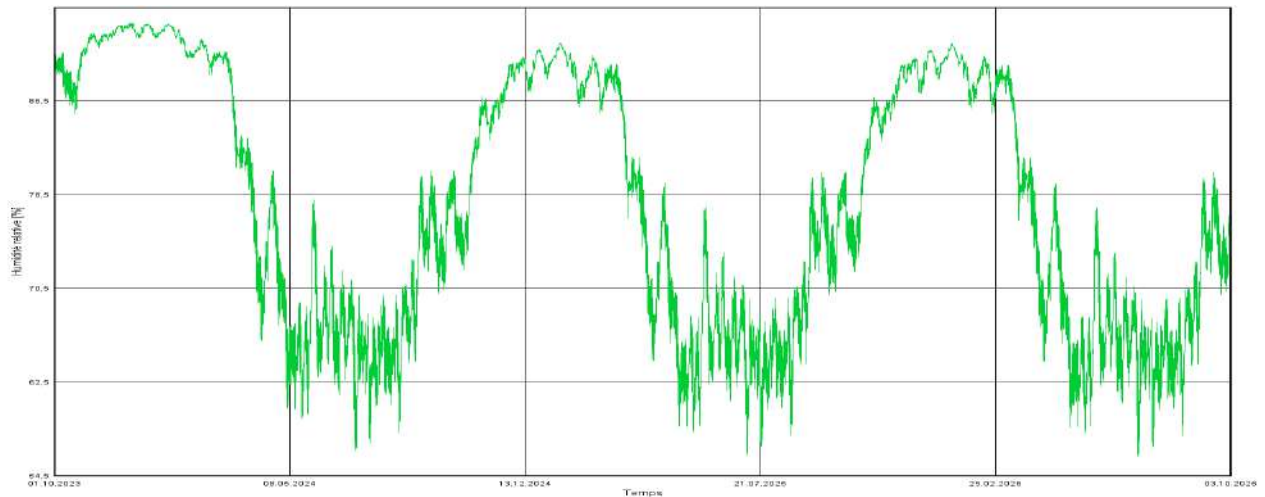


Figure 22 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de l'HR de l'air à l'interface paille, enduit chaux extérieur (côté paille) [%_{bs}]

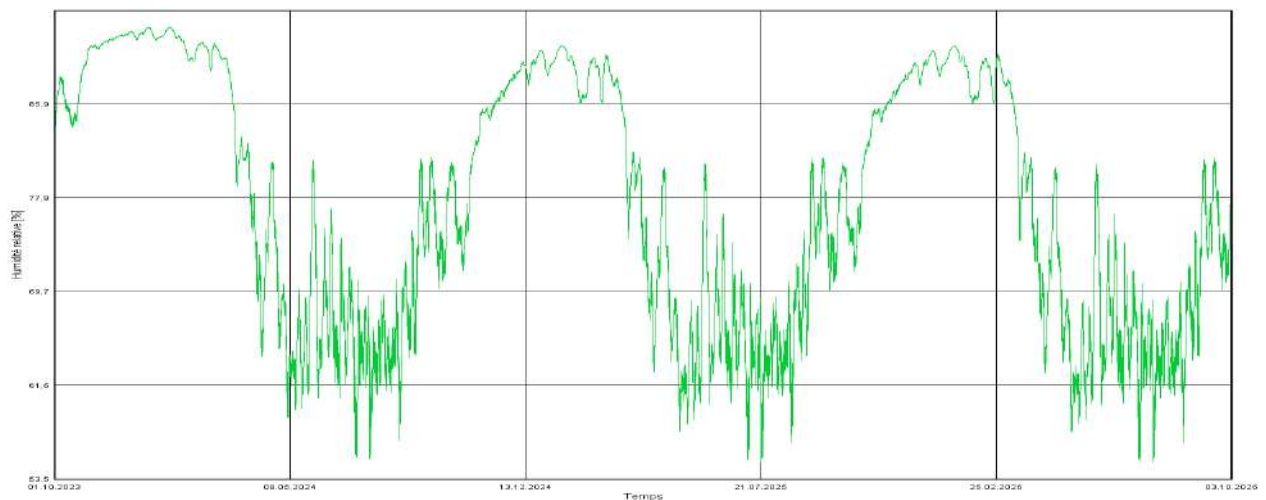


Figure 23 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l'interface paille, enduit chaux extérieur (côté enduit) [%_{bs}]

Puisque l'HR de l'air atteint tout de même des valeurs élevées côté paille, le contrôle de la teneur en eau sur base sèche de la paille à cette interface permet de s'assurer qu'il n'y a pas de développement de moisissure. Etant donné que cette teneur ne dépasse pas un pic de 20,6 % en début de simulation, il n'y a pas de risques.

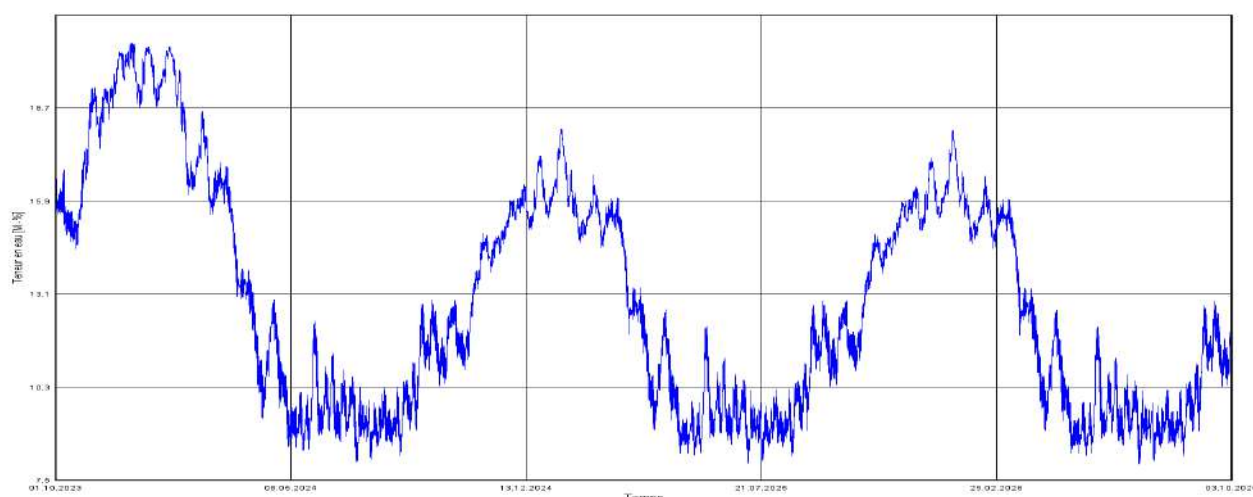


Figure 24 – WUFI® 2D : Simulation 4.1 – Evolution de la teneur en eau à l'interface paille, enduit chaux extérieur (côté paille) [%obs]

RESULTATS POUR LES AUTRES SIMULATIONS :

Toutes les autres simulations ont également confirmé les résultats favorables obtenus avec WUFI® Pro. Le respect des critères énoncés dans le tableau 12 sont résumés dans le tableau ci-dessous et détaillés en *Annexe 12* :

Tableau 18 – WUFI® 2D : Résumé des résultats des autres simulations

| SIMULATION | COHERENCE ET FIABILITE RESULTATS | ACCUMULATION D'EAU GLOBALE | PERENNITE DES INTERFACES SENSIBLES | PERENNITE STRUCTURE | MOISSURES BIOSOURCES |
|------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------|----------------------|
| 5.1 | Oui | Non Diminution | Oui | Oui | Non |
| 6.1 | Oui | Non Diminution | Oui | Oui | Non |
| 7.1 | Oui | Non Diminution | Oui | Oui | Non |
| 8.1 | Oui | Non Diminution | Oui | Oui | Non |
| 4.6 | Oui | Non Diminution | Oui | Oui | Non |
| 5.6 | Oui | Non Diminution | Oui | Oui | Non |
| 6.6 | Oui | Non Diminution | Oui | Oui | Non |
| 7.6 | Oui | Non Diminution | Oui | Oui | Non |
| 8.6 | Oui | Non Diminution | Oui | Oui | Non |

4.3. COMPARAISON AVEC UBAKUS

Une simulation rapide du cas 4.1 a été faite sur le logiciel Ubakus afin de comparer les résultats obtenus avec ceux de WUFI® Pro et WUFI® 2D. Pour rappel, les différences majeures entre ces logiciels sont explicitées en *Partie 1, paragraphe 4.3*.

Le logiciel Ubakus permet de modéliser rapidement la paroi en 2D et génère des résultats immédiats. Il n'est cependant pas possible d'y importer un fichier météo. De plus, il s'agit d'un logiciel de calcul statique, à l'inverse des logiciels WUFI®, qui proposent du calcul dynamique. Ainsi, Ubakus ne simule pas l'évolution temporelle du comportement à l'eau de la paroi, mais permet seulement d'entrer manuellement une valeur de température et d'humidité relative pour les ambiances extérieure et intérieure. A partir du fichier météo utilisé sur WUFI® (cf. *Partie 1, paragraphe 4.2*), divers couples (T_e ; HR_e) ont été identifiés et testés sur Ubakus, notamment sur la saison hivernale pendant laquelle les risques de condensation par point de rosée sont plus importants. Entre début

novembre et fin janvier, $HR_e \approx 85\%$ en moyenne, avec des pics pouvant atteindre $HR_{e\ max} \approx 100\%$. Sur cette même période, les températures oscillent entre $-6,8\text{ °C} \leq T_{e\ max} \leq 15\text{ °C}$.

En considérant les valeurs $(T_i; HR_i) = (20\text{ °C}; 50\%)$ et $HR_e = 85\%$, Ubakus indique que de la condensation se forme à l'interface entre l'isolant paille et l'enduit chaux extérieur à partir de $T_e \leq -2,8\text{ °C}$, avec une interface entièrement saturée dès $T_e \leq -4,6\text{ °C}$.

Or, d'après les Figure 22 et Figure 23, le logiciel WUFI® 2D indique qu'il n'y a aucun risque de condensation sur cette interface pendant toute la durée de la simulation. Cette incohérence de conclusion s'explique par les différences de méthodes de calcul et d'éléments pris en compte par les logiciels. En effet, Ubakus aura tendance à être plus prudent que WUFI® et à indiquer que des solutions ne sont pas ou que partiellement appropriées.

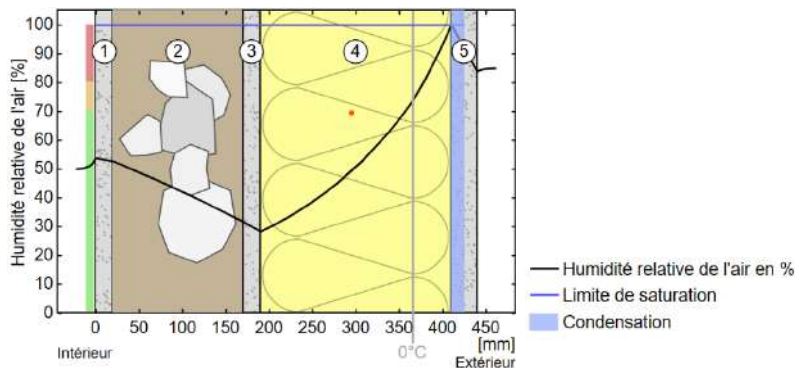


Figure 25 – Ubakus : Simulation 4.1 – Condensation à l'interface paille, enduit chaux extérieur pour $HR_e = 85\%$ et $T_e = -4,6\text{ °C}$

5. SIMULATIONS THERMIQUES – PLEIADES

5.1. CAS SIMULES ET HYPOTHESES DES SIMULATIONS

CAS :

Tous les murs de références sont modélisés dans le module STD, à leurs états existant et isolés, via un module fermé. Le module AMAPOLA permet ensuite de comparer de tous les complexes d'isolation sur chaque mur.

HYPOTHESES :

Cette étude s'intéresse à la rénovation des maisons individuelles. Ainsi, l'objectif sur Pleiades [83] est de représenter une maison individuelle plausible. Le choix s'est porté sur une maison unifamiliale de 4 pièces sur 2 niveaux avec 4 d'occupant-e-s (2 adultes et 2 enfants [84]). Dans les faits, une modélisation plus simple encore peut être effectuée sur le module STD en ne représentant qu'un niveau et en appliquant les hypothèses suivant-e-s :

Tableau 19 – Pleiades STD : Hypothèses communes à toutes les simulations

| PARAMETRE | DONNEES CONSIDEREES | JUSTIFICATIONS |
|-----------------------|--|--|
| MODELISATION | <ul style="list-style-type: none"> • Etage représenté : R+1 • Plancher intermédiaire : Inclus un matériau inertiel et est « mitoyen » • Plafond de combles : Isolé et « combles ventilés » coché • Orientation : 45 ° • Environnement proche : Rien | <ul style="list-style-type: none"> • Etage unique : Cela permet de rendre la modélisation la plus simple et rapide possible tout en ayant des résultats cohérents • Plancher intermédiaire et plafond de combles : Les paramètres permettent de simuler respectivement le RdC et la toiture • Orientation : Elle permet qu'une façade soit exposée nord-ouest • Environnement proche : Le fait de ne considérer aucun masque proche (végétations, autres bâtiments, etc.) engendre une condition plutôt défavorable pour la simulation |
| CLIMAT EXTERIEUR | <ul style="list-style-type: none"> • Fichier météo : Station Nancy, scénario RCP 4.5 du GIEC à l'horizon 2100 | <ul style="list-style-type: none"> • Choix du fichier : Explicité en première partie (cf. Chapitre 1, paragraphe 4.2) |
| PARAMETRES DE CONFORT | <ul style="list-style-type: none"> • Catégorie d'ambiance : II • Plage de confort : [16 °C ; 28 °C] • Degré-heure : « Degré-heure logement » et « surchauffe seulement » cochés | <ul style="list-style-type: none"> • Catégorie d'ambiance : D'après la norme NBN EN 15251, la catégorie II est à utiliser pour les bâtiments neufs ou rénovés [85] • Plage de confort : Valeurs par défaut de la catégorie II • Surchauffe seulement : Cela permet de n'obtenir que les degrés-heures liés à l'inconfort estival |
| CHAUFFAGE | <ul style="list-style-type: none"> • Période de chauffe : 15/10 au 06/05 • Consigne : 19 °C | <ul style="list-style-type: none"> • Période : Considérée par défaut sur Pleiades (conventionnelle) • Consigne : D'après la réglementation, dans un logement chauffé, la moyenne des températures mesurées au centre de chaque pièce est limitée à 19 °C [86] |
| VENTILATION | <ul style="list-style-type: none"> • Avant rénovation : $\tau_{av\ rén} = 2\text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ • Après rénovation : $\tau_{ap\ rén} = 0,6\text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ | <ul style="list-style-type: none"> • Avant rénovation : Dans les bâtiments construits avant 1975, la ventilation est naturelle, assurée par l'ouverture des fenêtres et les défauts d'étanchéité (bâti ancien [70], bâti moderne [71]) • Après rénovation : La valeur de $0,6\text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ traduit l'installation d'une VMC simple flux, plus fréquente en rénovation. |

De plus, voici le scénario d'occupation considéré, qui tient compte du fait que seul le R+1 est modélisé :

Tableau 20 – Pleiades STD : Scénario d'occupation

| PERIODE | PLAGE HORAIRE | OCCUPATION |
|--|-----------------------|------------|
| Semaine | 8h à 17h | 0 |
| | 17h à 22h | 2 |
| | 22h à 8h | 4 |
| Week-end et vacances scolaires (sans voyage) | 9h à 13h et 20h à 00h | 2 |
| | 13h à 20h | 0 |
| | 00h à 9h | 4 |
| Vacances scolaires (en voyage) | 2 semaines en août | 0 |

Enfin, les autres parois de la maison ont les compositions types et invariables suivantes. Néanmoins, une distinction est faite entre les bâtis ancien et moderne pour se rapprocher de la réalité des matériaux utilisés :

Tableau 21 – Pleiades STD : Compositions des autres parois

| TYPE DE PAROI | BATI ANCIEN | BATI MODERNE |
|------------------------|---|---|
| Plancher bas | <i>Non modélisé</i> | <i>Non modélisé</i> |
| Plancher intermédiaire | Bois massif – 2,5 cm Hourdis briques pleines – 15 cm | Bois léger – 2,5 cm Béton armé – 15 cm |
| Plancher de combles | Ouate de cellulose – 21 cm Hourdis briques pleines – 15 cm | Ouate de cellulose – 21 cm Béton armé – 15 cm |
| Toiture | <i>Non modélisé</i> | <i>Non modélisé</i> |
| Refend | Torchis – 15 cm | Parpaings – 20 cm |
| Cloisons distributives | Torchis – 10 cm | BA 13 – 0,125 cm Lame d'air – 5 cm BA 13 – 0,125 cm |
| Vitrages | Double vitrage | Double vitrage |

Note 1 : L'épaisseur de l'isolation du plancher de combles perdus a été déterminée en considérant un $\lambda = 0,039 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, afin de répondre à l'exigence de la RT Existant, qui impose un $R \geq 5,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ [36].

Note 2 : Les planchers du bâti ancien sont habituellement en bois. Puisque seul le R+1 est modélisé sur Pléiades, ils ont été remplacés par des planchers en briques pleines afin de simuler l'inertie thermique des espaces non modélisés.

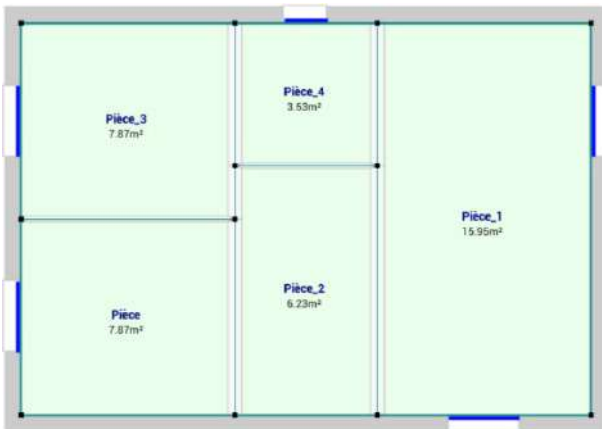


Figure 26 – Pleiades STD : Maison modélisée - Vue en plan

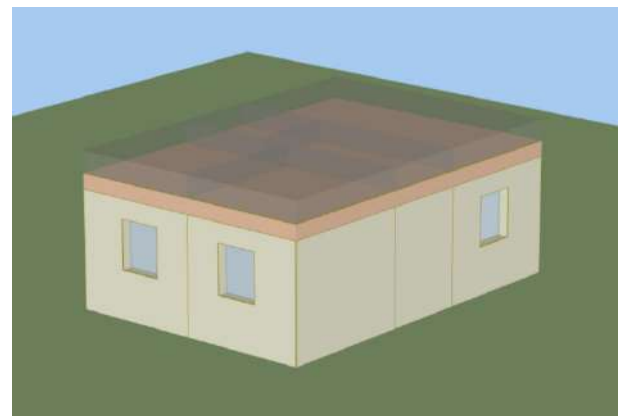


Figure 27 – Pleiades STD : Maison modélisée - Vue en 3D

En outre, le module AMAPOLA possède un algorithme d'optimisation STD, qui permet, à partir d'une première modélisation via le module STD, d'effectuer des comparaisons multicritères et d'identifier les solutions offrant le meilleur compromis via la représentation d'un front de Pareto. Ainsi, 8 modélisations ont été préalablement effectuées pour simuler la maison individuelle à son état existant avec les 8 murs de références possibles. Pour chacune d'entre elles, AMAPOLA a ensuite pu comparer le bâtiment à son état existant et isolé, en lui appliquant un à un tous les complexes d'isolation adaptés, et tester des variantes d'amélioration des résultats, décrites dans le *Tableau 22* ci-dessous. La variante de ventilation consiste à mettre en place une surventilation naturelle nocturne entre mi-mai et mi-septembre, et un scénario d'occultation des surfaces vitrées est créé :

Tableau 22 – Pleiades AMAPOLA : Variantes considérées des scénarios de ventilation et d’occultation

| PERIODE | VENTILATION [vol · h ⁻¹] | OCCULTATION [%] |
|---------|---|------------------------------|
| HIVER | 0,6 en continu | 100 % la nuit 0 % le jour |
| ETE | 6 la nuit 0,6 le jour quand habitant·e·s présent·e·s 0,2 la journée si habitant·e·s absent·e·s | 50 % la nuit 75 % le jour |
| VOYAGE | 0,6 en continu | 100 % en continu |

Note 1 : La valeur de 6 vol · h⁻¹ est une valeur fictive qui permet à Pleiades de prendre en compte les effets réels apportés par une surventilation naturelle nocturne, c’est-à-dire une ventilation prolongée. En réalité, elle est de 2 vol · h⁻¹ environ.

Note 2 : La valeur réduite de 0,2 vol · h⁻¹ en période surventilation limite l’entrée d’air chaud extérieur quand le logement est inoccupé.

Note 3 : La présence ou l’absence des habitant·e·s résulte du scénario d’occupation précédemment explicité.

De plus, voici les variantes simulées avec AMAPOLA. Seules les hypothèses qui varient sont mentionnées :

Tableau 23 – Pleiades AMAPOLA : Hypothèses modifiées pour chaque variante simulée

| CAS | VARIANTE BASE | VARIANTE 1 | VARIANTE 2 | VARIANTE 3 |
|----------|---|---|---|---|
| EXISTANT | $\tau_{av\ rén} = 2 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ Sans surventilation Sans occultation | $\tau_{av\ rén} = 2 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ Sans surventilation Avec occultation | / | / |
| ISOLE | $\tau_{ap\ rén} = 0,6 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ Sans surventilation Sans occultation | $\tau_{ap\ rén} = 0,6 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ Sans surventilation Avec occultation | $\tau_{ap\ rén} = 0,6 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ Avec surventilation Sans occultation | $\tau_{ap\ rén} = 0,6 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ Avec surventilation Avec occultation |

5.1. RESULTATS ET ANALYSE

Dans cette sous-partie, les résultats sont détaillés pour le voile béton¹. Pour les autres cas, seules les conclusions sont indiquées et les détails sont explicités en *Annexe 13*. De plus, certains résultats ont pu être regroupés car ils sont proches, voire égaux, donnant lieu la légende suivante :

- **ITE** : Paille, fibre de bois et polystyrène expansé (pour les cas où il est adapté)
- **ITI 1** : Laines de bois, chanvre, mouton, coton, roche, verre et ouate de cellulose
- **ITI 2** : Béton de chanvre-chaux et béton de chanvre-terre

5.1.1. MODULE AMAPOLA

Le module AMAPOLA permet d’évaluer les inconforts hivernal et estival. Les critères de comparaison sont donc les besoins de chauffage et les degré-heures (DH) d’inconfort.

ETAT INITIAL :

A l’état initial existant (cas existant, var. base), on a $B_{chauf\ initial} = 279,48 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ et $DH_{initial} = 438,97 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$. Les états initiaux isolés (cas isolé, var. base) comparés donne ce front de Pareto :

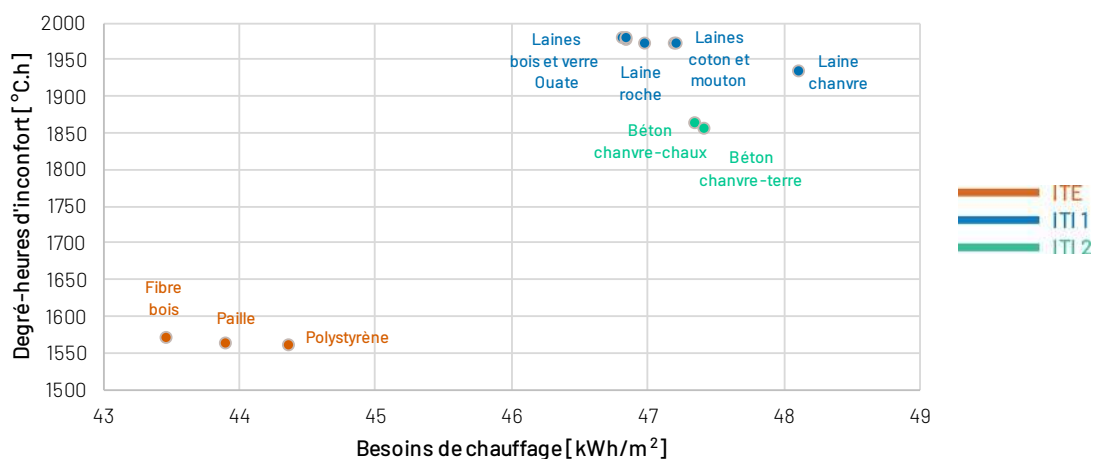


Figure 28 – Pleiades AMAPOLA : Voile béton, cas isolé, variante base – Optimisation des inconforts hivernal et estival

¹ Seuls les murs du bâti moderne peuvent être isolés avec tous les complexes d’isolation, ce qui justifie le choix de ce cas.

On peut ainsi noter que les ITE offrent la meilleure optimisation entre besoins de chauffage en hiver et DH d'inconfort en été. Au sein des ITI, deux groupes se démarquent, avec une meilleure optimisation pour les ITI 2 que pour les ITI 1. L'isolation du bâtiment (base) permet de réduire drastiquement les besoins de chauffage ; en moyenne, on observe -84 % pour les ITE et -83 % pour les ITI par rapport à l'état existant. Cependant, elle augmente significativement les degré-heures et génère un inconfort excessif, avec $1250 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h} \leq DH$; en moyenne, on a +260 % pour les ITE, +350 % pour les ITI 1 et +325 % pour les ITI 2 par rapport à l'état existant. Cela s'explique par l'ajout d'isolation et le changement du système de ventilation. En hiver, l'isolant améliore les performances thermiques globales du bâti et la mise en place d'une VMC simple flux réduit le taux de renouvellement d'air, limitant ainsi l'entrée d'air froid. En été, l'isolation thermique empêche le bâtiment de se rafraîchir rapidement et le taux de renouvellement d'air, constant, permet certes de limiter l'entrée d'air chaud, mais empêche le bâtiment de se décharger, via le renouvellement d'air, de toutes les calories accumulées.

VARIANTES D'AMELIORATION :

A l'état existant avec occultations (cas existant, var. 1), le bâtiment génère $B_{chauf\ initial} = 275,83 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ et $DH_{initial} = 286,08 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$. Puisque le bâtiment n'est pas isolé et que la ventilation reste naturelle via les défauts d'étanchéité notamment, l'occultation n'a qu'un impact négligeable en hiver. En revanche, elle permet de réduire d'un facteur 1,5 les DH d'inconfort en été. Le test des autres variantes permet d'identifier l'impact de l'ajout d'un scénario d'occultation (var. 1) et d'une surventilation naturelle nocturne en été (var. 2), séparément tout d'abord puis combinés (var. 3). Aussi, les fronts de Pareto donnent toujours les mêmes conclusions (ITE mieux que ITI 2 et mieux que ITI 1), mais ne sont que peu, voire pas lisibles. Ils ne sont donc pas présentés par la suite.

• Comparaison des besoins de chauffage :

Pour chaque complexe d'isolation, la comparaison des variantes amène aux mêmes conclusions :

- En plus de l'isolation, l'occultation des vitrages (var. 1 et 3) permet de réduire les déperditions thermiques par les vitrages et améliore donc légèrement les besoins de chauffage. En moyenne, on a -86 % pour les ITE et -85 % pour les ITI par rapport à l'état existant ;
- Enfin, l'ajout de la surventilation nocturne (var. 2) n'a pas d'impact sur les besoins de chauffage, puisqu'elle n'est mise en place qu'en été.

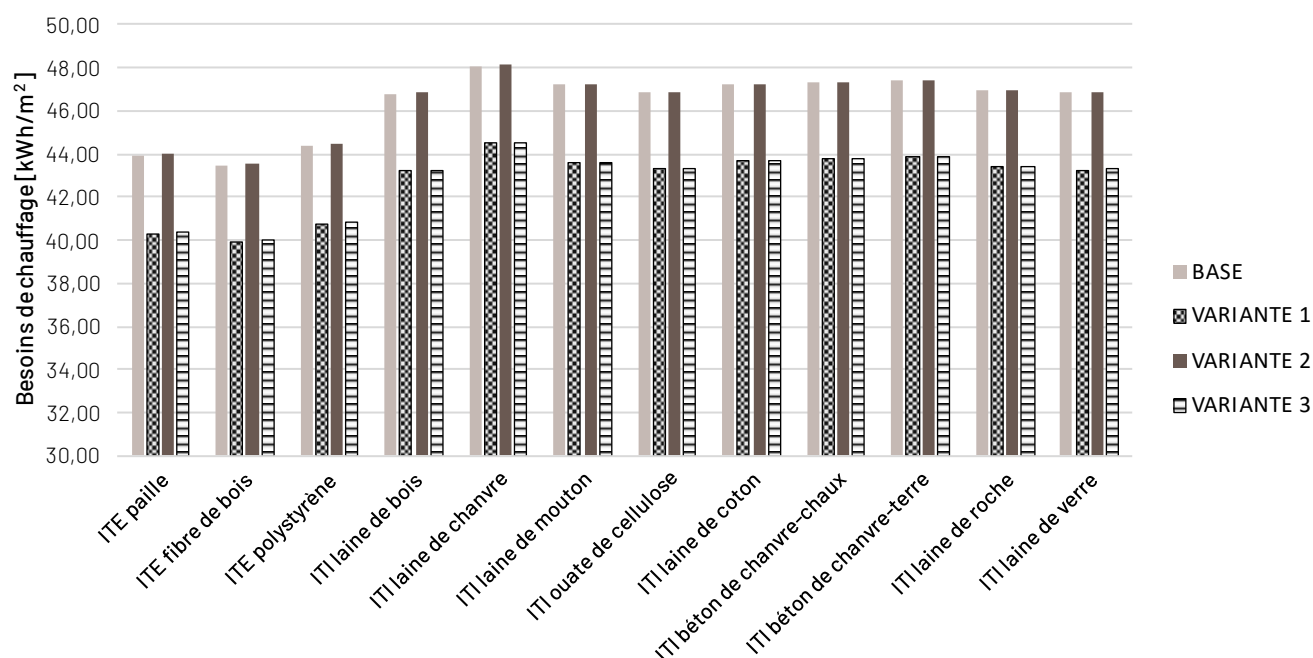


Figure 29 – Pleiades AMAPOLA : Voile béton – Comparaison des besoins de chauffages des quatre variantes

• Comparaison des degré-heures d'inconfort :

Les variantes d'amélioration ont toutes un réel impact sur l'inconfort estival et permettent de respecter le critère de confort thermique $DH \leq 350 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$:

- L'occultation des vitrages (var. 1) en journée réduit fortement les DH. En moyenne, on obtient -89 % pour les ITE, -43 % pour les ITI 1 et -56 % pour les ITI 2 par rapport à l'état existant ;

- L'ajout d'une surventilation naturelle nocturne (var. 2) a un impact considérable, même sans occultation diurne des vitrages, avec des DH inférieurs à la variante 1. En moyenne, on a -99 % pour les ITE, -79 % pour les ITI 1 et -88 % pour les ITI 2 par rapport à l'état existant ;
- Enfin, la combinaison des deux (var. 3) est la variante la plus performante. En théorie, elle permet de réduire de près de 100 % les degré-heures d'inconfort pour tous les complexes d'isolation par rapport à l'état existant¹.

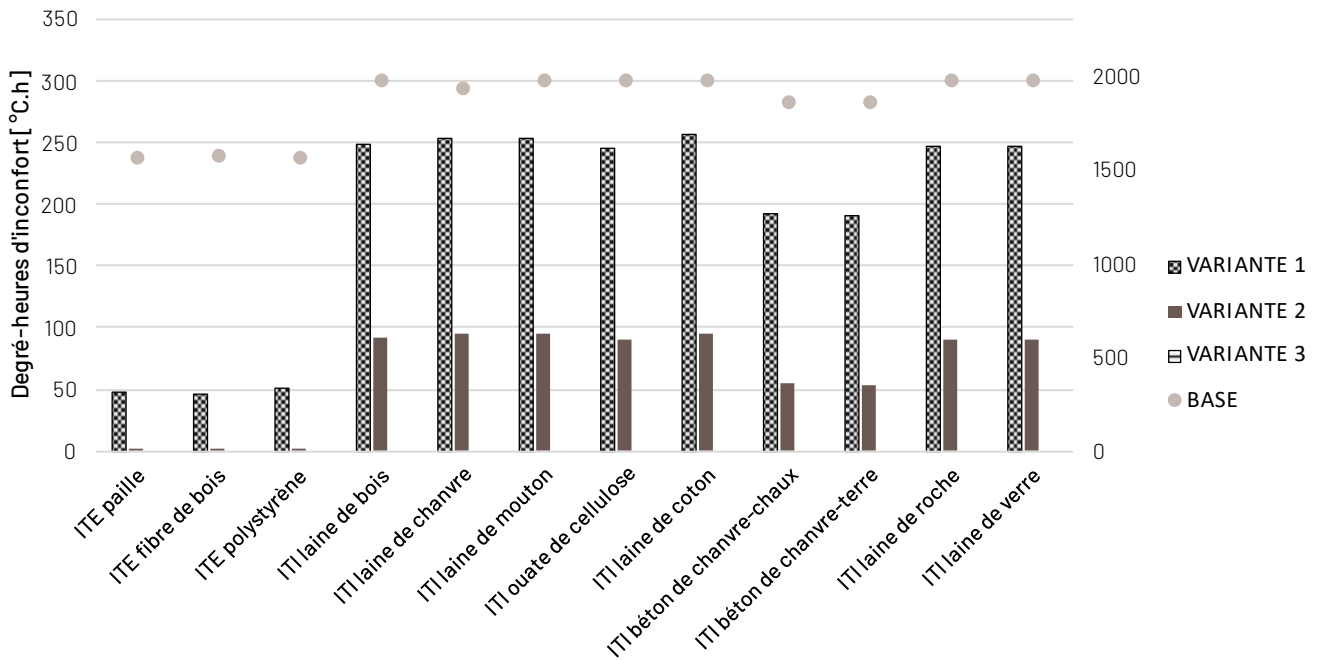


Figure 30 – Pleiades AMAPOLA : Voile béton – Comparaison degré-heures d'inconfort des quatre variantes

• **Variante optimale :**

En croisant les résultats obtenus, il apparaît que la variante 3 est la plus performante. En effet, l'isolation améliore les performances thermiques en hiver, mais entraîne inévitablement une dégradation de la situation estivale, qui peut être compensée par les stratégies testées. Il est cependant important de nuancer ces résultats, car ils sont théoriques et basés sur des scénarios idéaux. Néanmoins, la surventilation nocturne et l'occultation des vitrages sont des solutions économes et performantes à considérer dans une stratégie de diminution de l'inconfort estival.

• **Lien entre les degré-heures d'inconfort et l'effusivité thermique :**

L'évaluation des DH permet d'identifier nettement les groupes ITE, ITI 1 et ITI 2 : les ITE apparaissent bien plus performantes que les autres solutions, et au sein des ITI, les mélanges à base de chanvre (ITI 2) donnent des meilleurs résultats que les isolants en laine ou en vrac (ITI 1). De plus, il apparaît que la surventilation et l'occultation des vitrages ont un impact important sur tous les complexes d'isolation, mais plus ou moins marqué.

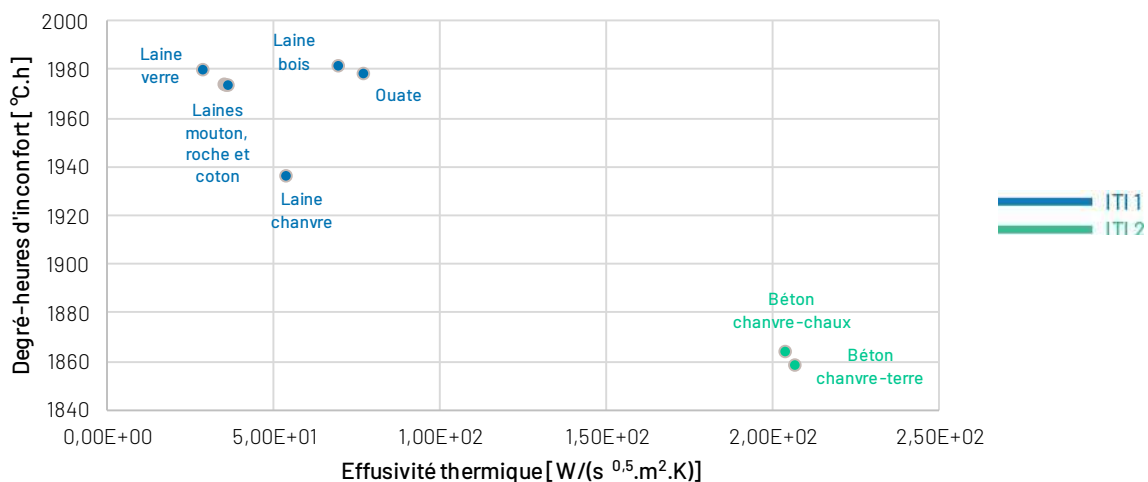


Figure 31 – Pleiades AMAPOLA : Voile béton, base – Evolution des degré-heures d'inconfort en fonction de l'effusivité thermique

¹ Sur le graphique ci-dessous, les variantes 1, 2 et 3 sont lisibles sur l'axe de gauche, et la base sur l'axe de droite

Cela peut être majoritairement justifié par l'effusivité thermique des matériaux situés en contact avec l'ambiance intérieure. Plus elle est grande, plus le matériau peut gérer les variations de température, en absorbant des calories quand la température s'élève et les restituant quand elle diminue, et donc plus les DH sont faibles. La *Figure 31* représente l'évolution des DH en fonction de l'effusivité pour le voile béton initial isolé (cas isolé, var. base) et illustre le lien entre ces grandeurs. Pour le cas de l'ITE, c'est l'effusivité du béton qui est importante. Celle du béton est bien plus élevée que celles des isolants en ITI simulés et vaut $b_{\text{béton}} = 1,77E + 03 [W \cdot s^{0,5} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$, ce qui permet d'expliquer pourquoi les variantes 1 et 2 en ITE sont plus performantes l'été que les ITI.

RESULTATS DES AUTRES SIMULATIONS :

Voici les besoins de chauffage et DH d'inconfort des cas initiaux existants pour les autres murs :

Tableau 24 – Pleiades AMAPOLA : Autres murs, cas initiaux existant – Besoins de chauffage et degré-heures d'inconfort

| PARAMETRE | MUR 1 | MUR 2 | MUR 3 | MUR 4 | MUR 5 | MUR 6 | MUR 7 | MUR 8 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Besoins de chauffage [kWh · m ⁻²] | 279,5 | 215,9 | 136,3 | 205,1 | 229,6 | 240,6 | 239,0 | 173,3 |
| Degré-heure [°C · h] | 439,0 | 319,2 | 192,0 | 476,3 | 507,7 | 308,2 | 293,3 | 249,0 |

Concernant les résultats obtenus pour les autres variantes, visibles en *Annexe 13*, les constats sont identiques : les ITE sont plus performantes, et les bétons de chanvre présentent un intérêt particulier en ITI. Une différence est cependant à noter concernant les murs en grès (6) et en calcaire (7) pour les cas en ITE ; ce sont les seuls murs pour lesquels la variante 1 permet d'obtenir $DH \approx 0 \text{ °C} \cdot \text{h}$. On peut faire l'hypothèse que cette différence est liée à la diffusivité thermique des matériaux de structure, qui décrit la rapidité du déplacement de l'onde de chaleur à travers la masse. Les murs 6 et 7 ont une diffusivité de l'ordre de $E - 06 [m^2 \cdot s^{-1}]$, tandis qu'elle est de l'ordre de $E - 07 [m^2 \cdot s^{-1}]$ pour les autres murs, ce qui implique que la chaleur emmagasinée depuis l'intérieur dans ces deux murs s'y propagera légèrement plus vite et restera donc moins longtemps sur la face intérieure.

5.1.2. MODULE STD

COURBES DE TEMPERATURE :

La modélisation de certaines variantes sur le module STD a permis d'aboutir aux courbes d'évolution des températures intérieures en fonction de la température extérieure et du temps suivantes :

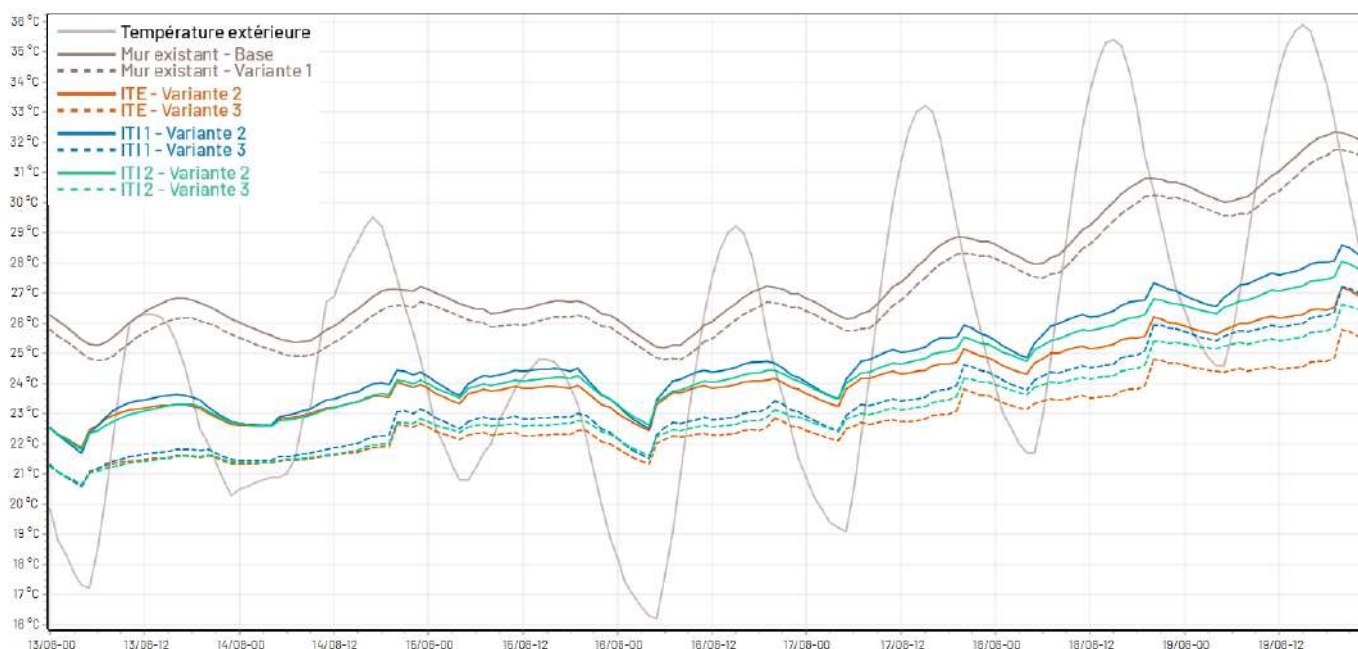


Figure 32 – Pleiades STD : Voile béton – Courbes de température pendant la semaine la plus chaude (du 13 au 20 août)

On peut noter que globalement, tous les complexes d'isolation permettent de déphaser de quelques heures et d'amortir l'amplitude de température extérieure. Sur la semaine la plus chaude, tous les isolants apportent un déphasage similaire, tandis que l'amortissement varie en fonction du groupe d'isolant ; les ITE engendrent le meilleur amortissement, et les ITI 2 sont légèrement meilleures que les ITI 1. Pour les autres murs de référence, les constats sont identiques et les courbes sont visibles en *Annexe 13*.

CALCULS DE DEPHASAGES ET AMORTISSEMENTS THERMIQUES :

Ce constat amène à se questionner quant à la pertinence d'utiliser les déphasage et amortissement thermiques comme argument de choix entre plusieurs isolants d'un même groupe, alors que de nombreux fabricants utilisent ces valeurs, à l'échelle de l'isolant seul, comme argument de vente de leurs produits. En première réponse, voici les résultats obtenus pour les déphasages $\eta(T)$, facteurs d'amortissement $f(T)$ et amortissements $A(T)$ de 3 complexes d'ITE et 3 d'ITI, calculés via la méthode des admittances décrite en *Annexe 9* :

Tableau 25 – Calculs de déphasages et d'amortissements thermiques via la méthode des admittances

| SUPPORT | ITE paille | | | ITE fibre de bois | | | ITE polystyrène | | |
|---------|------------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|------------------|---------------|---------------|
| MUR | $\eta(T)$ [h] | $f(T)$ [%] | $A(T)$ [%] | $\eta(T)$ [h] | $f(T)$ [%] | $A(T)$ [%] | $\eta(T)$ [h] | $f(T)$ [%] | $A(T)$ [%] |
| Mur 1 | 8,906 | 7,094 | 92,906 | 7,787 | 5,913 | 94,087 | -9,781 | 11,888 | 88,112 |
| Mur 2 | 6,598 | 5,330 | 94,670 | 5,482 | 4,428 | 95,572 | 11,906 | 9,087 | 90,913 |
| Mur 3 | 4,723 | 4,286 | 95,714 | 3,623 | 3,522 | 96,478 | 9,953 | 7,693 | 92,307 |
| Mur 4 | 8,697 | 10,754 | 89,246 | 7,585 | 8,908 | 91,092 | Non étudié | | |
| Mur 5 | 8,647 | 9,320 | 90,680 | 7,531 | 7,740 | 92,260 | Non étudié | | |
| Mur 6 | 3,190 | 1,476 | 98,524 | 7,177 | 4,514 | 95,486 | Non étudié | | |
| Mur 7 | 2,295 | 1,131 | 98,869 | 1,177 | 0,942 | 99,058 | Non étudié | | |
| Mur 8 | 0,149 | 1,079 | 98,921 | -0,968 | 0,894 | 99,106 | Non étudié | | |

| SUPPORT | ITI laine de coton | | | ITI laine de bois | | | ITI béton de chanvre-chaux | | |
|---------|--------------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------|
| MUR | $\eta(T)$ [h] | $f(T)$ [%] | $A(T)$ [%] | $\eta(T)$ [h] | $f(T)$ [%] | $A(T)$ [%] | $\eta(T)$ [h] | $f(T)$ [%] | $A(T)$ [%] |
| Mur 1 | -8,097 | 33,363 | 66,637 | 10,844 | 15,483 | 84,517 | 0,889 | 2,363 | 97,637 |
| Mur 2 | -10,287 | 25,854 | 74,146 | 8,637 | 9,389 | 90,611 | -1,259 | 1,447 | 98,553 |
| Mur 3 | 11,718 | 12,954 | 87,046 | 6,750 | 4,915 | 95,085 | -2,974 | 0,802 | 99,198 |
| Mur 4 | -8,148 | 39,489 | 60,511 | 10,727 | 16,307 | 83,693 | 0,911 | 2,510 | 97,490 |
| Mur 5 | -8,209 | 37,631 | 62,369 | 10,660 | 16,310 | 83,690 | 0,789 | 2,494 | 97,506 |
| Mur 6 | -8,785 | 25,958 | 74,042 | 5,109 | 3,281 | 96,719 | -4,868 | 0,505 | 99,495 |
| Mur 7 | 9,230 | 5,384 | 94,616 | 4,202 | 2,550 | 97,450 | -5,780 | 0,392 | 99,608 |
| Mur 8 | 7,314 | 4,270 | 95,730 | 2,167 | 1,859 | 98,141 | -7,710 | 0,289 | 99,711 |

Pour chacun des complexes d'isolations, on peut noter que les valeurs de déphasage et d'amortissement varient en fonction du mur sur laquelle ils sont appliqués. Ces grandeurs doivent ainsi être considérées à l'échelle d'une paroi multicouche et non pas d'un matériau seul. De plus, certaines valeurs de déphasage sont négatives. Puisque le calcul se fait sur une période de 24 h, en considérant des courbes de températures sinusoïdales, une valeur négative est égale à cette même valeur + 24 h (ex : un déphasage de -1,3 h correspond à un déphasage de 22,7 h). Aussi, les propriétés de bases des matériaux exercent une influence plus ou moins forte sur les valeurs obtenues (ex : laine de coton, laine de bois et fibre de bois, polystyrène). De fait, il est difficile de tirer des conclusions généralisables des déphasage et amortissement thermiques. Leurs valeurs dépendent des cas et hypothèses formulées concernant les matériaux et leur agencement dans la paroi. Aussi, lorsque l'amortissement est important, le déphasage n'est plus si important puisque l'amplitude de température est largement atténuée.

6. ACV

6.1. CAS CALCULES ET HYPOTHESES DES ACV

CAS :

L'ACV est réalisée sur Microsoft Excel [87] et est calculée pour les 12 complexes d'isolation indiqués dans le *Tableau 7* sur la base d'une paroi d'épaisseur variable suivant la solution, de hauteur 2,5 m et de longueur 2,45 m. Ces valeurs ont été choisies car :

- La hauteur de 2,5 m correspond à une hauteur sous plafond courante dans les logements ;
- La longueur de 2,45 m, issue de coupes horizontales traduisant les règles de mises en œuvre (cf. *Annexe 14*), permet de prendre en compte un nombre entier de montants d'ossature, lorsqu'ils sont nécessaires.

HYPOTHESES :

Il est important de préciser que les calculs d'ACV de ce projet ne sont réalisés qu'à des fins d'estimation des impacts des différents complexes d'isolation et ne prétendent pas indiquer des valeurs officielles. En effet, des FDES existent pour tous les matériaux considérés, mais les épaisseurs d'isolants étudiées ne correspondent pas toujours à l'unité

fonctionnelle (UF) de la ou les FDES disponibles. Par exemple, l'unique fiche publiée pour la laine de bois choisie décrit les impacts pour une épaisseur de 100 mm, alors que l'épaisseur étudiée est de 145 mm. Dans ce cas de figure, le choix a été fait d'approximer les impacts via des produits en croix entre les valeurs de la fiche disponible et l'épaisseur souhaitée (si plusieurs fiches existent pour le même produit, celle avec l'épaisseur la plus proche sert au calcul). Si cette méthode permet d'estimer les impacts et peut donc se justifier dans cette étude, elle ne serait pas autorisée dans le cas d'un projet de construction neuve réel soumis réglementairement à la RE2020 [88]. Le tableau ci-dessous détaille les autres hypothèses considérées :

Tableau 26 – ACV : Hypothèses communes à tous les calculs

| PARAMETRE | DONNEES CONSIDEREES | JUSTIFICATIONS |
|------------------------------------|---|---|
| PERIODE D'ETUDE DE REFERENCE (PER) | • PER : 50 ans | • PER : Cette valeur est considérée par convention pour tous les bâtiments [68] |
| DUREE DE VIE ESTIMEE (DVE) | • DVE d'un matériau : Durée de vie de référence (DVR) indiquée sur sa FDES | • DVE : Elle est considérée égale à la DVR par convention [68] |
| METHODE DE CALCUL | • Indicateur d'impact sur le changement climatique : Méthode dynamique simplifiée • Autres indicateurs : Méthode statique | • Différenciation des méthodes : Explicité en Deuxième partie, paragraphe 1.3.1 |
| TEMPORALITE DES EMISSIONS | • Phases de production et de construction : $t = 0$ • Phase d'exploitation : $t = 1$ à PER • Phases de fin de vie et module D : $t = PER$ | • Temporalités : Elles sont considérées par convention [68] |
| INDICATEURS PRIS EN COMPTE | • Liste des indicateurs : - Impact carbone - Déchets éliminés (dangereux, non-dangereux, radioactifs) - Utilisation totale d'énergie en tant que matière première (renouvelable et non renouvelable) - Utilisation de matières secondaires - Utilisation nette d'eau douce | • Choix des indicateurs : Ils semblent pertinents pour caractériser plus finement et globalement les impacts liés aux complexes d'isolation (les impacts pollution de l'eau et de l'air ne sont pas évalués, car il ne sont plus mentionnés dans les fiches sous la norme A2) |
| ELEMENTS PRIS EN COMPTE | • Pour chaque complexe isolant, en plus de l'isolant : - Système de maintien - Membrane hygrovariable (pour ITI) - Revêtement | • Eléments : L'objectif est d'estimer l'ACV des complexes d'isolation tout entier et de ne pas se limiter à la comparaison des isolants uniquement |

De plus, quelques précisions sont à apporter :

- L'ACV pour le complexe ITE paille ne prend pas en compte le système de fixation des bottes de paille (chevilles rosaces), car aucune fiche n'est répertoriée sur la base INIES pour ce type de produit. Son impact est cependant faible, car une seule fixation suffit par botte ;
- Les résultats de l'ACV pour la laine de mouton ne sont pas présentés, car elle est décrite par une DED avec des valeurs défavorables. Les résultats obtenus semblent aberrants et non exploitables ;
- Parmi les FDES utilisées, certaines sont encadrées par la norme A1, favorable aux matériaux biosourcés.

6.2. RESULTATS ET ANALYSE

DETAILS DES INDICATEURS :

- **Impact sur le réchauffement climatique :**

Cet indicateur évalue les émissions de GES des matériaux.

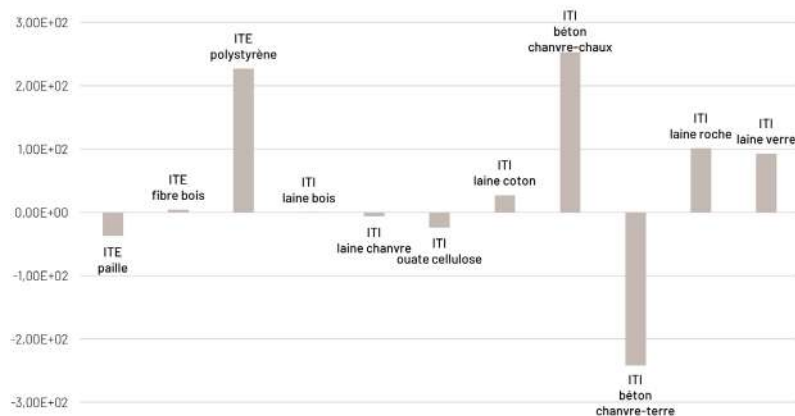


Figure 33 – ACV : Impact sur le réchauffement climatique [kg_{eq} CO₂]

L'impact sur le réchauffement climatique des divers complexes d'isolation est globalement élevé pour les solutions industrialisées (PSE et laines minérales) et faible, voire négatif pour les matériaux biosourcés. Il y a cependant une exception pour l'ITI béton de chanvre-chaux, dont l'impact carbone est très important ; la chaux provient en effet de la calcination du calcaire, et l'épaisseur mise en œuvre est importante.

- **Déchets non dangereux, dangereux et radioactifs éliminés :**

Ces indicateurs évaluent la quantité de déchets produits tout au long du cycle de vie du matériau, en prenant en compte les installations nécessaires à leurs traitement et stockage en fin de vie [89].

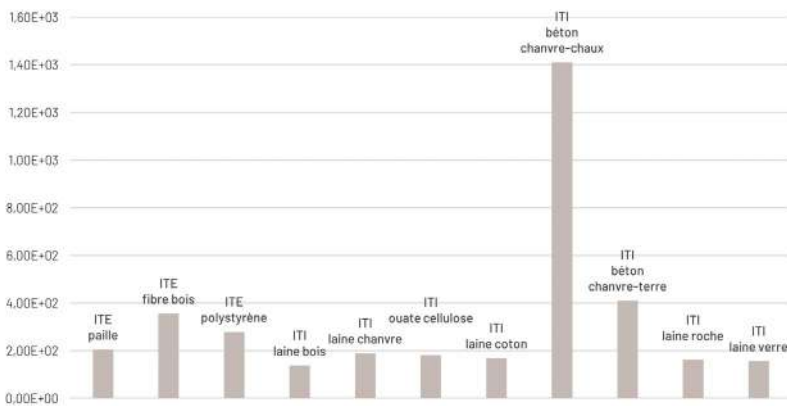


Figure 34 – ACV : Déchets non dangereux éliminés [kg]

D’après les trois graphiques ci-contre, les proportions de déchets éliminés peuvent grandement varier en fonction du type de déchet et du matériau considéré.

Concernant les déchets non dangereux, l’ITI béton de chanvre-chaux se démarque, probablement du fait du processus de fabrication de la chaux et de la quantité de matière nécessaire pour atteindre la résistance thermique souhaitée.

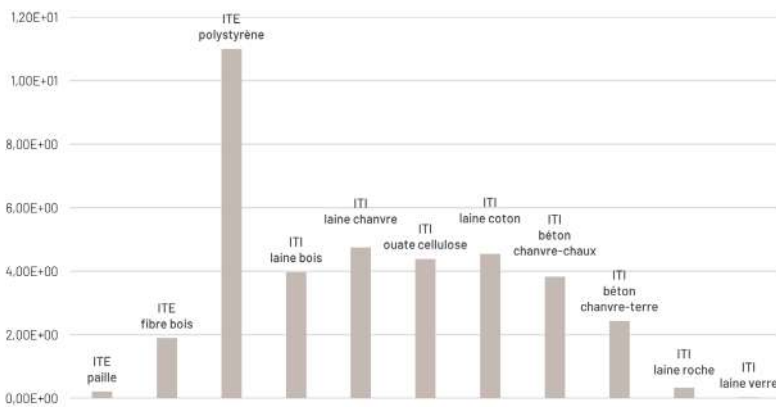


Figure 35 – ACV : Déchets dangereux éliminés [kg]

Dans la catégorie des déchets dangereux éliminés, l’ITE polystyrène expansé se distingue nettement des autres complexes, ce qui peut être lié à la provenance du polystyrène, issu du pétrole.

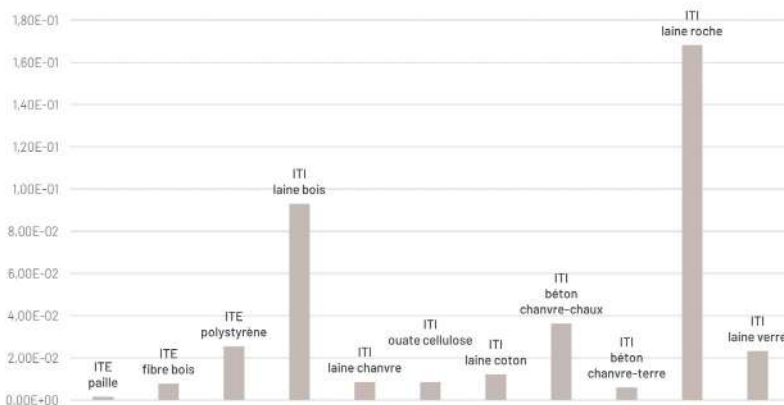


Figure 36 – ACV : Déchets radioactifs éliminés [kg]

Enfin, dans les déchets radioactifs, l’impact de l’ITI laine de roche est largement prépondérant.

- **Utilisation de ressources d’énergie primaire renouvelable et non renouvelable :**

Cet indicateur évalue la quantité d’énergie primaire renouvelable (EnR) ou non (EnNR), soit disponible sous forme de matières premières (ex : contenu énergétique du matériau), soit issue de combustibles renouvelables récupérés après une première utilisation ou issue de déchets, qui remplacent des combustibles primaires (ex : matériau de déconstruction servant de combustible) [89].

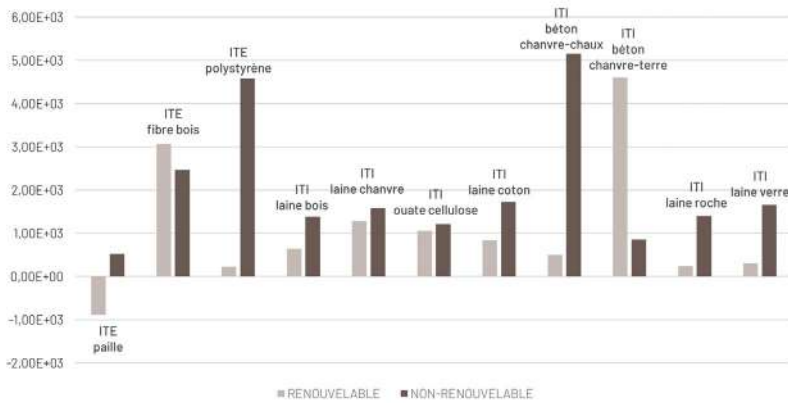


Figure 37 – ACV : Utilisation de ressources d'énergie primaire [MJ PCI]

● Utilisation nette d'eau douce :

Il évalue la quantité d'eau douce d'origine naturelle utilisée au cours du cycle de vie du matériau [89].

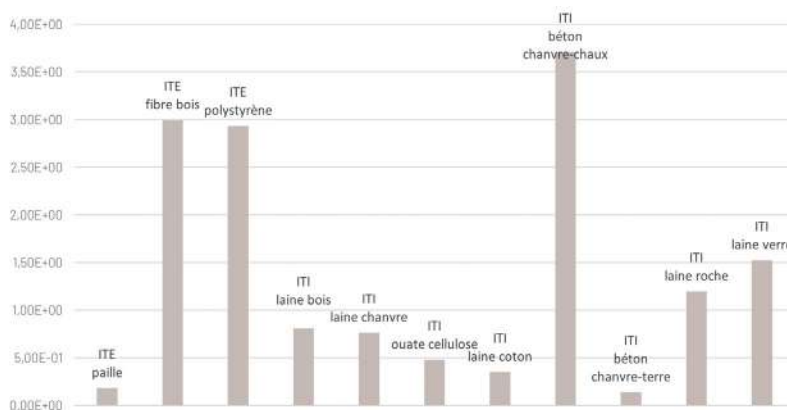


Figure 38 – ACV : Utilisation nette d'eau douce [m³]

Globalement, les solutions industrialisées traduisent des quantités d'EnR faibles et EnNR importantes, bien supérieures aux matériaux biosourcés. La même exception concernant l'ITI béton de chanvre-chaux peut néanmoins être faite.

Les consommations d'eau douce sont majoritairement importantes pour les ITE fibre de bois, ITE polystyrène expansé et ITI béton de chanvre-chaux.

OBSERVATIONS :

Si on se limite à l'évaluation de l'impact sur le réchauffement climatique des différents complexes d'isolation, comme c'est souvent le cas dans divers travaux, on peut établir un classement allant de la solution la moins impactante à la plus impactante :

1. ITI béton de chanvre-terre
2. ITE paille
3. ITI ouate de cellulose
4. ITI laine de chanvre
5. ITI laine de bois
6. ITE fibre de bois
7. ITI laine de coton
8. ITI laine de verre
9. ITI laine de roche
10. ITE polystyrène expansé
11. ITI béton de chanvre-chaux

Cependant, la prise en compte de multiples indicateurs complexifie l'analyse globale et ne permet pas d'établir un classement fixe. Il dépend en effet des indicateurs jugés prépondérants et des nombre et type d'indicateurs considérés. A la lecture des divers graphiques présentés ci-dessus, on peut néanmoins conclure que les complexes d'isolation biosourcés, à l'exception du béton de chanvre-chaux, se distinguent très nettement des complexes standardisés, notamment la paille, pour laquelle tous les impacts sont parmi les plus faibles. Aussi, le béton de chanvre-terre présente un intérêt particulier, puisqu'utiliser la terre et non la chaux comme liant peut réduire drastiquement l'impact de l'isolant, voire inverser la tendance, comme pour l'impact carbone.

De plus, les résultats sont impactés par des éléments propres aux FDES, tels que sa norme (A1 ou A2) ou les hypothèses considérées (distance parcourue par le matériau jusqu'au chantier de construction, etc.). En outre, une

FDES collective, puisqu'elle couvre plusieurs fabricants, génère des valeurs plus défavorables qu'une FDES individuelle, valable pour un unique matériau d'un unique fabricant. Toutes les FDES utilisées sont indiquées en *Annexe 10*.

7. POUR ALLER PLUS LOIN

A l'issue de cette étude, l'approfondissement, voire l'analyse complète, de certains points semble pertinent.e.

Tout d'abord, plusieurs paramètres énoncés ont été écartés de l'étude en début de projet par manque de moyens et/ou de temps, mais contribueraient à poursuivre et affiner davantage l'analyse des complexes d'isolation présentés. On retrouve notamment les aspects financiers, de qualité de l'air intérieur, acoustiques, de comportement au feu et d'étude des ressources initiales (cf. *Première partie, paragraphe 3.5*).

Ensuite, l'étude s'est focalisée sur des complexes d'isolation ne mettant en œuvre que l'enduit chaux (ou plastique pour le PSE) en revêtement extérieur. Il pourrait être intéressant d'étudier les variations engendrées par l'application d'un enduit terre ou d'un bardage bois ; ce dernier permettrait également d'inclure d'autres solutions telles que la ouate de cellulose et la laine de mouton en ITE. De plus, l'étude des mélange terre-paille, panneau de fibre de bois rigide et ouate de cellulose en projection humide semblerait judicieuse en ITI.

En outre, le comportement hydrique de certains matériaux n'a pas pu être évalué à cause d'un manque de données. Il s'agit des laines de coton et de chanvre, du béton de chanvre-terre et de l'enduit chaux-chanvre (cet enduit n'a donc tout simplement pas pu être utilisé). Il serait donc pertinent de mener des études poussées de ces matériaux, notamment pour le béton de chanvre-terre, qui révèle un fort potentiel en comparaison au béton de chanvre-chaux.

Enfin, il serait intéressant d'évaluer plus finement les déphasage et amortissement thermiques des complexes d'isolation ainsi que les paramètres qui les influencent.

TROISIEME PARTIE – CREATION DES OUTILS PEDAGOGIQUES

1. OUTILS A REALISER

1.1. OBJECTIF ET CHOIX DES OUTILS

OBJECTIF :

L'objectif final de ce PFE est de valoriser l'étude des complexes d'isolation en outils pédagogiques, permettant de sensibiliser et d'informer des cibles diverses, allant du grand public aux professionnel·le·s de la construction. De fait, ces outils doivent tout à la fois vulgariser et préciser des connaissances et résultats techniques, pour être compréhensibles par le plus grand nombre.

FORME DES OUTILS :

La spécificité du projet est d'avoir mené une analyse multicritère non pas d'isolants seuls, mais de complexes d'isolation complets. En début de projet, l'idée première était ainsi de concevoir des maquettes de ces complexes, utilisables par le CBGE lors d'événements, formations, etc. Cependant, les besoins et demandes du collectif ont évolué au cours du projet, et le choix des outils s'est finalement porté sur la réalisation de fiches « complexes d'isolation » :



Figure 39 – Validation des choix, forme et contenu des fiches pédagogiques

Il s'agit d'un ensemble de fiches comprenant 2 fiches « généralités » et 8 fiches « mur » (cf. *Troisième partie, paragraphe 1.2*), permettant de compléter, sans recopier, les documentations existantes. La réalisation de fiches est apparue plus pertinente au vu de l'analyse multicritère menée et des résultats obtenus. En effet, l'étude des complexes d'isolation, et de leur application possible sur des murs spécifiques, implique de comprendre plusieurs principes fondamentaux et de connaître les hypothèses utilisées pour cadrer l'étude. De plus, l'évaluation de propriétés et performances diverses expose la complexité d'un arbitrage entre plusieurs solutions et met en perspective des notions telles que les déphasage et amortissement thermiques (inertie de transmission), qui sont souvent utilisés comme argument pour promouvoir des isolants, mais sont en réalité à nuancer. De fait, le besoin d'une vulgarisation des principes et hypothèses et d'une présentation simple des résultats et conclusions principales a été identifié.

En parallèle, une proposition a tout de même été faite au CBGE concernant la forme que pourraient prendre les maquettes. Etant donné que plusieurs complexes d'isolation ont les mêmes règles de mise en œuvre, il ne semble pas nécessaire de concevoir une maquette par complexe. Il s'agirait plutôt de créer 5 maquettes « génériques », traduisant en 3D les coupes de mise en œuvre présentées en *Annexe 14*, et représentant chacune un ou plusieurs complexes :

- Maquette 1 : ITE biosourcées en panneaux → bottes de paille et panneaux de fibre de bois ;
- Maquette 2 : ITE non biosourcées en panneaux → polystyrène expansé ;
- Maquette 3 : ITI laines biosourcées et vrac → laines de bois, chanvre, mouton et coton et ouate de cellulose ;
- Maquette 4 : ITI bétons de chanvre → bétons de chanvre-chaux et chanvre-terre ;
- Maquette 5 : ITI laines minérales → Laines de roche et verre.

Puisque seul·e·s les types et épaisseurs d'isolant (et donc d'ossature bois de fixation pour la maquette 3) varient, une même maquette pourrait représenter plusieurs systèmes ; il suffirait simplement d'adapter la légende de la maquette en fonction du cas souhaité. Le CBGE a les coupes de mise en œuvre à disposition et pourra ainsi réaliser les maquettes ultérieurement.

1.2. CONTENU DES FICHES PEDAGOGIQUES

FICHES « GENERALITES » :

La première fiche détaille les principales définitions et hypothèses de l'étude, nécessaires à la compréhension des fiches « mur ». D'une part, les définitions sont constituées d'une première phrase vulgarisée, qui explique simplement la notion définie, et intègre ensuite des détails plus précis et techniques. Cela permet à un maximum de personnes de pouvoir cerner la notion selon son niveau de connaissance initial, mais aussi de cibler les aspects non maîtrisés pour pouvoir les approfondir, si besoin. Certaines définitions sont accompagnées d'un schéma de principe simple pour illustrer le propos. D'autre part, seules les hypothèses indispensables sont énoncées : les murs existants et complexes d'isolation étudiés, le paramètre initial de la comparaison, les coupes de mise en œuvre des complexes, le climat extérieur choisi, les logiciels utilisés et intérêts des simulations effectuées, les variantes d'amélioration du confort thermique considérées et les prérequis et cas exclus de l'étude. Un paragraphe en fin de fiche renvoie le/la lecteur·rice vers des sources complémentaires, incluant le mémoire de PFE et d'autres rapports d'études réalisés.

La seconde fiche expose les hypothèses et résultats des ACV des différents complexes d'isolation, incluant tous les indicateurs calculés. Les hypothèses sont importantes pour clarifier les limites des ACV (elles ne sont pas réglementaires), les données manquantes et les points de vigilances à considérer. Une brève conclusion met en avant l'importance d'évaluer plusieurs indicateurs.

Ces deux fiches sont ainsi un prérequis à la consultation des fiches « mur » et constituent une base commune de définitions et hypothèses pour le CBGE.

• **Fiches « mur » :**

Pour chaque mur existant de référence étudié, une fiche résume les principales informations. Elle détaille tout d'abord le comportement hydrique du mur, via sa capillarité, son hygroscopicité et sa résistance à la diffusion de vapeur d'eau, et résumé les précautions à prendre pour lui appliquer une ITE ou une ITI. Dans un second temps, elle expose les principaux résultats analysés des performances thermiques obtenues avec tous les complexes d'isolation et résume les points clés dans une brève conclusion.

2. EXEMPLES DE FICHES

Les pages suivantes détaillent les :

- Fiche généralités n° 1 : Définition et hypothèses
- Fiche généralités n° 2 : Analyse du cycle de vie
- Fiche mur n° 1 : Voile béton

Les autres fiches « mur » sont visibles en *Annexe 15*, à savoir :

- Fiche mur n° 2 : Parpaings
- Fiche mur n° 3 : Briques alvéolées
- Fiche mur n° 4 : Pan de bois, torchis
- Fiche mur n° 5 : Pan de bois, briques d'adobe
- Fiche mur n° 6 : Grès
- Fiche mur n° 7 : Calcaire
- Fiche mur n° 8 : Briques de terre cuite pleines

Note : Cette fiche constitue un prérequis à la consultation de la « Fiches généralités n° 2 » et des huit « Fiche mur ». Elle détaille les principales hypothèses et définitions nécessaires à leur compréhension.

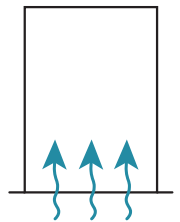
DEFINITIONS



≡ COMPORTEMENT HYDRIQUE :

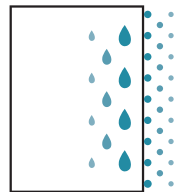
CAPILLARITE :

- Un matériau capillaire permet l'**ascension naturelle de l'eau en son sein**, et ce, malgré la force de gravité. La capillarité est ainsi liée à la porosité du matériau, c'est-à-dire la quantité de vide qu'il contient, mais aussi à la structuration de ses pores ; des pores semblables à des tubes fins et continus favorisent le déplacement de liquide.
- C'est une propriété qu'il est important de considérer lors du choix des matériaux et de leur association au sein d'une même paroi.
- Elle est évaluée par le coefficient d'absorption à la pluie battante A_w [kg/(m².s^{0,5})]. Plus sa valeur est faible, plus la capillarité est faible.



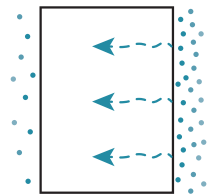
HYGROSCOPICITE :

- Un matériau hygroscopique peut **stocker puis déstocker de l'eau dans ses pores** en fonction du taux d'humidité relative de l'air. Lorsque ce taux augmente, une partie de la vapeur d'eau que l'air contient est alors adsorbée par le matériau, puis s'y transforme en eau liquide via le phénomène de condensation capillaire.
- L'hygroscopicité présente un intérêt notable pour le confort hygrothermique et la qualité de l'air intérieur en atténuant les pics d'humidité.
- Elle est évaluée par la teneur en eau de référence du matériau w_{80} [kg/m³], c'est-à-dire la quantité d'eau qu'il contient lorsque l'humidité relative de l'air ambiant vaut 80 %. Plus sa valeur est grande, plus l'hygroscopicité est élevée.



RESISTANCE A LA DIFFUSION DE VAPEUR D'EAU :

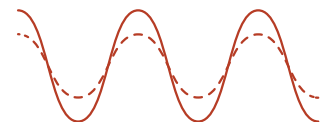
- La résistance désigne la capacité d'un matériau à **s'opposer à la diffusion de vapeur d'eau** entre les ambiances intérieure et extérieure. On le dit « fermé » s'il est résistant à cette diffusion et « ouvert » s'il ne l'est pas. Le phénomène de diffusion résulte de la différence de pression partielle de vapeur qui s'exerce sur une paroi entre les deux ambiances.
- Cette propriété est à considérer pour éviter la condensation de vapeur par point de rosée dans la paroi et assurer la pérennité des matériaux.
- Elle est évaluée par le coefficient de diffusion à la vapeur d'eau μ [-], qui caractérise le comportement général du matériau à la vapeur, et par la lame d'air équivalente S_d [m], qui quantifie sa résistance en fonction de l'épaisseur mise en œuvre. Plus sa valeur est grande, plus le matériau est résistant.



≡ PERFORMANCES THERMIQUES :

AMORTISSEMENT THERMIQUE A [%] :

- L'amortissement thermique décrit l'**atténuation de l'onde de chaleur** entre les ambiances extérieure et intérieure. Il participe à l'inertie globale du bâtiment et donc au confort intérieur, en limitant la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment.
- L'amortissement est influencé par la diffusivité thermique et doit être calculé à l'échelle d'une paroi complète, car il dépend du type et de l'agencement des matériaux.



La courbe en pointillés est amortie par rapport à la courbe pleine

DEGRE-HEURES D'INCONFORT DH [°C.h] :

- Les degré-heures d'inconfort caractérisent le **niveau d'inconfort perçu par les occupants**. Ils sont semblables à un compteur cumulant chaque degré inconfortable de chaque heure sur toute la période estivale, à partir de 26 °C la nuit et 26-28 °C le jour.
- La Réglementation Environnementale 2020 définit trois paliers :

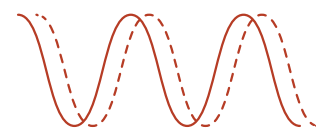
$DH < 350$ °C.h, pas d'inconfort

$350 < DH < 1250$ °C.h, inconfort possible

1250 °C.h $< DH$, inconfort excessif

DEPHASAGE THERMIQUE η [h] :

- Le déphasage thermique correspond au **décalage temporel** entre le moment où a lieu le **pic de température** extérieure et celui où a lieu le pic de température intérieure. Il participe à l'inertie globale du bâtiment et donc au confort intérieur, en retardant la pénétration de chaleur dans le bâtiment.
- Le déphasage est influencé par la diffusivité thermique et doit être calculé à l'échelle d'une paroi complète, car il dépend du type et de l'agencement des matériaux.



La courbe en pointillés est déphasée par rapport à la courbe pleine

DIFFUSIVITE THERMIQUE a [m^2/s] :

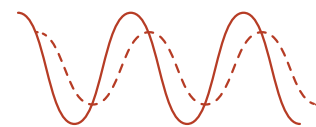
- La diffusivité thermique d'un matériau décrit la **rapidité du déplacement de l'onde de chaleur** à travers sa masse. Plus elle est faible, plus les déphasage et amortissement thermiques sont importants.
- Elle est calculée grâce à trois grandeurs : la conductivité thermique λ [$W/(m.K)$], la masse volumique ρ [kg/m^3] et la capacité thermique massique C [$J/(kg.K)$] du matériau.

EFFUSIVITE THERMIQUE b [$Wh.s^{0.5}/(m^2.K)$] :

- L'effusivité thermique d'un matériau décrit la **rapidité d'absorption de la chaleur** dans sa masse. Elle est particulièrement intéressante pour les matériaux en contact avec l'ambiance intérieure, car plus elle est élevée, plus les variations de température intérieure sont atténuées.
- Elle est calculée grâce aux trois mêmes grandeurs que la diffusivité thermique.

INERTIE THERMIQUE DE TRANSMISSION :

- L'inertie de transmission permet au bâtiment de **s'opposer à la transmission de chaleur** entre les ambiances extérieure et intérieure via le déphasage et l'amortissement thermiques de son amplitude. Elle est impactée par les sollicitations provenant de l'extérieur (variation de température, rayonnement solaire, etc.).
- Elle est inefficace en l'absence de variations importantes de la température extérieure, mais l'est d'autant plus que ces variations sont élevées et qu'elle est couplée à une surventilation nocturne.
- La propriété des matériaux la plus importante est alors la diffusivité thermique.



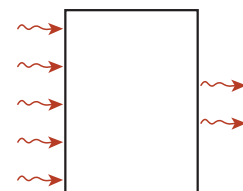
La courbe en pointillés est amortie et déphasée par rapport à la courbe pleine

INERTIE THERMIQUE INTERIEURE OU D'ADSORPTION :

- L'inertie intérieure représente la **capacité** des couches superficielles de la face interne des parois à **absorber, stocker et restituer** les apports instantanés de chaleur. Elle est impactée par les sollicitations provenant de l'intérieur d'un bâtiment (nombre et activité des occupants, présence d'équipements, rayonnement solaire via les vitrages, etc.).
- Elle est particulièrement efficace pour des variations de température élevées et couplée à une stratégie de surventilation nocturne.
- La propriété des matériaux prépondérante est alors l'effusivité thermique ; plus elle est élevée, plus elle limite les valeurs du gradient de température de l'ambiance.

RESISTANCE THERMIQUE R [$m^2.K/W$] :

- La résistance thermique représente la **capacité d'une épaisseur de matériau à résister à la transmission de chaleur** par conduction.
- Pour un matériau, elle est calculée grâce à son épaisseur e [m] et sa conductivité thermique λ [$W/(m.K)$]. A l'échelle d'une paroi, il faut additionner les résistances de chaque matériau, ainsi que deux résistances superficielles pour les surfaces extérieure et intérieure, afin d'inclure la convection et le rayonnement.



IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET RESSOURCES :

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) :

- L'ACV est une **méthode d'évaluation environnementale** qui permet de quantifier divers impacts d'un produit, d'un service, d'un procédé ou d'un ouvrage sur l'ensemble de son cycle de vie. Ce dernier comprend les étapes de production (incluant l'extraction des matières premières), de construction, d'utilisation, de fin de vie et parfois de bénéfices et charges au-delà même du cycle de vie.
- L'impact sur le réchauffement climatique est calculé via la méthode dynamique simplifiée, qui pondère les émissions de gaz à effet de serre en attribuant un poids plus faible à celles émises à la fin du cycle de vie. Les autres indicateurs sont calculés via la méthode statique, qui n'applique aucune pondération.

FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE (FDES) :

- La FDES d'un matériau **présente les résultats de son ACV** en détaillant ses impacts pour chaque phase du cycle de vie de chaque indicateur. Elle est utilisée dans le calcul d'une ACV globale à l'échelle d'un bâtiment par exemple.
- Une FDES peut être individuelle, c'est-à-dire qu'elle concerne un produit fabriqué par un industriel, ou collective, c'est-à-dire qu'elle concerne un même produit type fabriqué par plusieurs industriels.
- En l'absence de FDES pour un matériau, une Donnée Environnementale par Défaut (DED) peut être utilisée. Elle est cependant défavorable, car les valeurs des impacts sont majorées d'un coefficient de sécurité.
- Les FDES sont encadrées par une norme. Les fiches publiées à partir du 01/11/2022 sont soumises à la norme N2 et celles publiées avant à la norme N1.



CAS ETUDIES :

MURS EXISTANTS DE REFERENCE :

• Les murs considérés sont représentatifs du bâti moderne et ancien de la région Grand-Est, sans être exhaustifs. Il s'agit de :

BATI MODERNE :

1. Voile béton
2. Mur en parpaings
3. Mur en briques alvéolées

BATI ANCIEN :

4. Mur à pan de bois, remplissage torchis
5. Mur à pan de bois, remplissage briques d'adobe
6. Mur en grès
7. Mur en calcaire
8. Mur en briques de terre cuite pleines

COMPLEXES D'ISOLATION ETUDIES :

• Les complexes d'isolation étudiés représentent différentes filières de matériaux biosourcés et géosourcés du Grand Est ainsi que des matériaux industrialisés couramment utilisés :

ISOLATIONS THERMIQUES PAR L'EXTERIEUR (ITE) :

- Bottes de paille
- Panneaux de fibre de bois rigides
- Polystyrène expansé

ISOLATIONS THERMIQUES PAR L'INTERIEUR (ITI) :

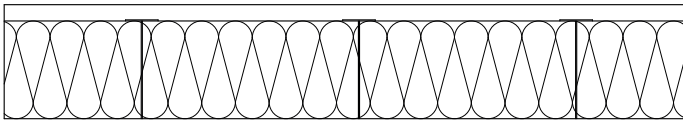
- Laine de bois semi-rigide
- Laine de chanvre
- Laine de mouton
- Ouate de cellulose insufflée
- Laine de coton recyclée
- Béton de chanvre-chaux
- Béton de chanvre-terre

REVETEMENTS EXTERIEURS :

- Enduit chaux
- Enduit plastique

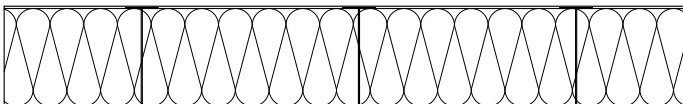
REVETEMENTS INTERIEURS :

- Enduit plâtre
- Enduit terre
- Plaque de Fermacell
- Plaque de plâtre BA13



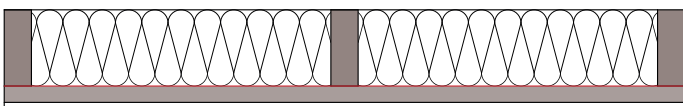
Coupe de mise en œuvre - ITE biosourcées
Bottes de paille, panneaux de fibre de bois

Enduit chaux - 3 cm
Isolant - épaisseur variable



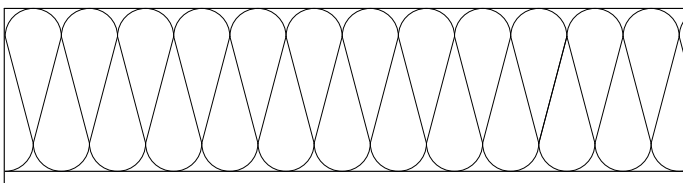
Coupe de mise en œuvre - ITE polystyrène
Polystyrène expansé

Enduit plastique - 3 mm
Isolant - épaisseur variable



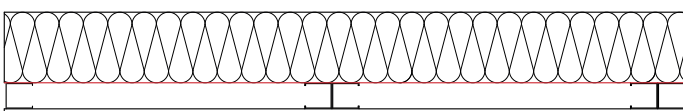
Coupe de mise en œuvre - ITI laines et vrac biosourcé-e-s
Laines de bois, chanvre, mouton, coton et ouate de cellulose

Isolant et ossature bois - épaisseur variable
Membrane hygrovariable - 1 mm
Lame d'air et tasseaux bois - 3 cm
Plaque Fermacell - 1,25 cm



Coupe de mise en œuvre - ITI bétons de chanvre
Bétons de chanvre-chaux et chanvre-terre

Isolant - épaisseur variable
Enduit terre - 8 mm



Coupe de mise en œuvre - ITI laines minérales
Laines de roche et de verre

Isolant - épaisseur variable
Membrane hygrovariable - 1 mm
Lame d'air et ossature métallique - 5 cm
Plaque de plâtre BA13 - 1,25 cm

RESISTANCE THERMIQUE DES PAROIS :

• La résistance thermique a été choisie comme paramètre initial afin de déterminer les épaisseurs d'isolant nécessaires dans chaque complexe d'isolation. Plus précisément, les valeurs de résistance thermique considérées sont les valeurs minimales requises dans le cadre des primes Certificat d'Economie d'Énergie (CEE) et du label Bâtiment Basse Consommation (BBC) rénovation résidentiel 2024 :

$$R \geq 3,7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W, pour les murs en ITI}$$

$$R \geq 4,4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W, pour les murs en ITE}$$

SIMULATIONS :

CLIMAT EXTERIEUR CONSIDERE :

• Le fichier météo utilisé dans les diverses simulations est le fichier de base de Nancy modifié pour y inclure le scénario RCP 4.5 du GIEC à l'horizon 2100. Cette modification permet une prise en compte de potentiels effets du réchauffement climatique.

SIMULATIONS DU COMPORTEMENT HYDRIQUE :

LOGICIEL UTILISE : WUFI® Pro, Version 6.7 et WUFI® 2D, Version 4.5 – Licences étudiantes

• Ces simulations ont permis de vérifier que les complexes d'isolation soient bien applicables sur les murs existants, sans générer de problématiques telles que l'accumulation d'eau dans les parois, le développement de moisissures dans certains matériaux, etc.

SIMULATIONS DU COMPORTEMENT THERMIQUE :

LOGICIEL UTILISE : Pleiades, Modules STD et AMAPOLA, Version 6.24.1.2 – Licence INSA Strasbourg

• Ces simulations ont permis, pour chaque mur de référence, de comparer les impacts engendrés par la mise en œuvre des complexes d'isolation sur une maison individuelle. Ainsi, l'inconfort hivernal, caractérisé par les besoins de chauffage, l'inconfort estival, caractérisé par les degré-heures d'inconfort, et l'impact des inerties thermiques ont été évalués.

• Les résultats présentés dans les huit « Fiche mur » sont issues de la confrontation de variantes. A partir des cas initiaux existants et isolés (base), des variantes de protection solaire des vitrages (var. 1) et de ventilation (var. 2) ont été testées, seules tout d'abord puis combinées (var. 3), pour améliorer les inconforts thermiques. Ces variantes sont décrites dans le tableau suivants :

| CAS | BASE | VARIANTE 1 | VARIANTE 2 | VARIANTE 3 |
|-----------------------|--|--|--|--|
| MUR A L'ETAT EXISTANT | Ventilation naturelle Sans surventilation Sans occultation | Ventilation naturelle Sans surventilation Avec occultation | / | / |
| MUR ISOLE | VMC simple flux Sans surventilation Sans occultation | VMC simple flux Sans surventilation Avec occultation | VMC simple flux Avec surventilation Sans occultation | VMC simple flux Avec surventilation Avec occultation |

• La variante de protection solaire vise à mettre en place un scénario d'occultation des vitrages ; en hiver, les volets sont fermés la nuit (100 %) et ouverts le jour (0 %), tandis qu'en été, ils sont moyennement ouverts la nuit (50 %) et fermés le jour (75 %).

• La variante de ventilation consiste à mettre en place une surventilation naturelle nocturne sur la période estivale ; il s'agit simplement d'ouvrir les fenêtres la nuit pour refroidir le bâtiment. Elle est complétée par un taux de renouvellement d'air réduit en journée lorsque la maison est inoccupée, pour limiter l'entrée d'air chaud.

• **ATTENTION** : Les résultats de ces variantes sont théoriques, puisqu'ils impliquent de pouvoir respecter à la lettre les hypothèses des scénarios. Ils permettent tout de même une bonne estimation des impacts de l'isolation et des variantes.

PREREQUIS ET CAS EXCLUS :

PREREQUIS :

- Les résultats présentés sont indissociables de certains principes, tels que :
 - La bonne prise en compte de l'humidité dans les parois ;
 - Le respect des spécificités liées au type de bâti et au système d'isolation ;
 - La mise en place d'un système de ventilation performant ;
 - La bonne conception relative à l'étanchéité à l'air, aux ponts thermiques et au feu ;
 - La consultation de professionnel-le-s pour effectuer un diagnostic préalable du bâti existant avant des travaux d'isolation.

CAS EXCLUS :

- Aussi, les résultats ne sont pas applicables pour :
 - Les murs qui présentent une humidification anormale et doivent donc être traités au préalable ;
 - Les rénovations de bâtiments devant respecter des contraintes patrimoniales spécifiques.



≡ DOCUMENTS ANNEXES AUX FICHES :

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDE :

- Ces fiches sont issues d'un Projet de Fin d'Etude d'ingénierie, dont le rapport complet est accessible sur le site internet du Collectif Biosourcés Grand Est. Il détaille l'ensemble des méthode, hypothèses, calculs, résultats, etc.

≡ SOURCES COMPLEMENTAIRES :

AUTRES ETUDES :

- D'autres études permettent d'approfondir les sujets abordés, telles que :

Enertech pour Oktave et le programme Climaxion de la Région Grand Est et de l'ADEME, RIESER, T., BOISSONNEAU, T., MOTEAU, S. (2017). *Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien.*

CEREMA de l'Est, ENSA Toulouse, LMDC de l'INSA Toulouse, MPF pour le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. (2013). *HYGROBA : Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes.*

CODEM-Le BATLAB. (2021). *Guide la rénovation de parois à l'aide de matériaux biosourcés.*

CEREMA, Atelier ODM SARL d'architecture pour les anciennes DREAL Alsace et DRAC Alsace. (2014-2015). *Habitat ancien en Alsace.*

DREAL Grand Est, CEREMA Est. (2019). *Bien rénover mon logement en Lorraine.*

Envirobat Grand Est ARCAD-LQE dans le cadre du SRCAE et du PREH. (2017). *Le bâti ancien Champardennais.*

Note : Cette fiche est indissociable de la « Fiche généralités n° 1 » et constitue un prérequis à la consultation des huit « Fiche mur ». Elle détaille les hypothèses principales et les résultats de l'ACV de chaque complexe d'isolation.

HYPOTHESES



ANALYSE DU CYCLE DE VIE :

MODULE CONSIDERE :

LOGICIEL UTILISE : Microsoft Office Excel, LTSC Professionnel Plus 2021

Pari de 2,5 m de haut par 2,45 m de long, avec une épaisseur variable en fonction du complexe d'isolation.

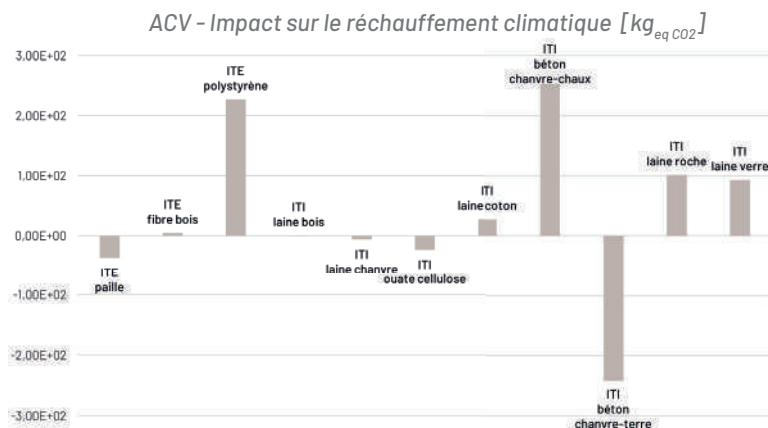
POINTS DE VIGILANCE :

- L'ACV réalisée n'est pas réglementaire, mais sert uniquement à estimer les impacts.
- Parmi les FDES utilisées, certaines sont encore encadrées par la norme A1, plutôt favorable aux matériaux biosourcés.
- L'ACV pour le complexe ITE paille ne prend pas en compte le système de fixation des bottes de paille.
- Les résultats de l'ACV pour la laine de mouton ne sont pas présentés, car les impacts sont issus d'une DED et semblent aberrants.
- Les impacts mentionnés dans les FDES sont liés à une hypothèse sur la distance parcourue par le matériau entre son lieu de production et son lieu de mise en œuvre. Or, cette distance peut beaucoup varier en réalité.

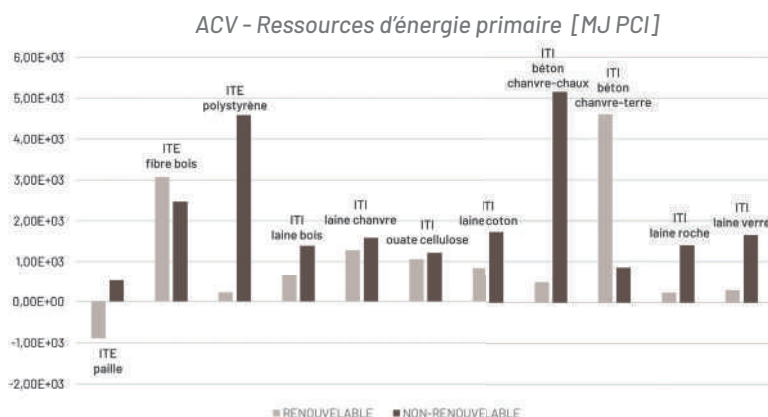
ANALYSE DU CYCLE DE VIE



INDICATEURS :

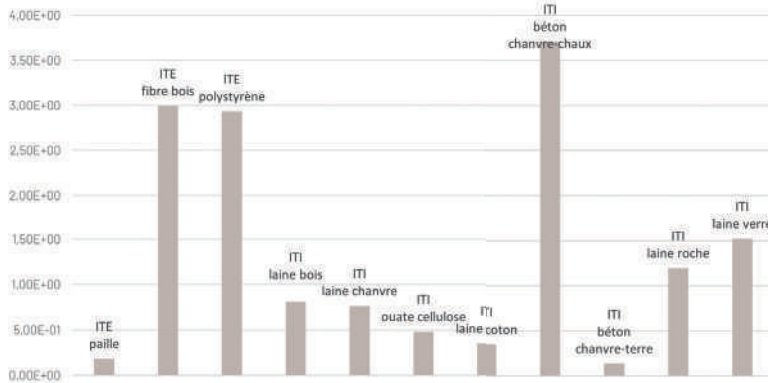


L'impact sur le réchauffement climatique des divers complexes d'isolation est globalement élevé pour les solutions industrialisées (PSE et laines minérales) et faible, voire négatif pour les matériaux biosourcés. Il y a cependant une exception pour l'ITI béton de chanvre-chaux, dont l'impact carbone est très important. La chaux provient en effet de la calcination du calcaire, et l'épaisseur mise en œuvre est très importante.



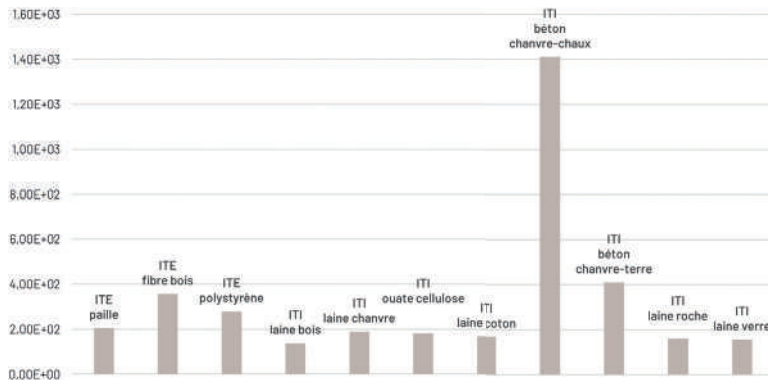
Cet indicateur évalue la quantité d'énergie primaire renouvelable (EnR) ou non (EnNR), soit disponible sous forme de matières premières (ex : contenu énergétique du matériau), soit issue de combustibles renouvelables récupérés après une première utilisation ou issue de déchets, qui remplacent des combustibles primaires (ex : matériau de déconstruction servant de combustible). Globalement, les solutions industrialisées traduisent des quantités d'EnR faibles et EnNR importantes, bien supérieures aux matériaux biosourcés. La même exception concernant l'ITI béton de chaux-chanvre peut néanmoins être faite.

ACV - Utilisation nette d'eau douce [m³]



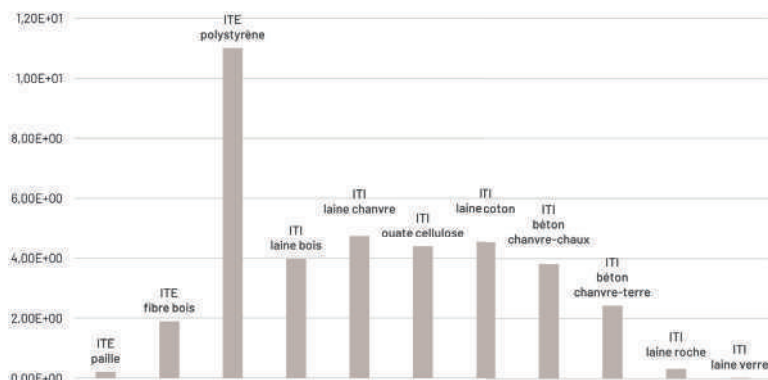
Les consommations nettes d'eau douce, d'origine naturelle, sont majoritairement importantes pour les ITE fibre de bois, ITE polystyrène expansé et ITI béton de chanvre-chaux.

ACV - Déchets non dangereux éliminés [kg]



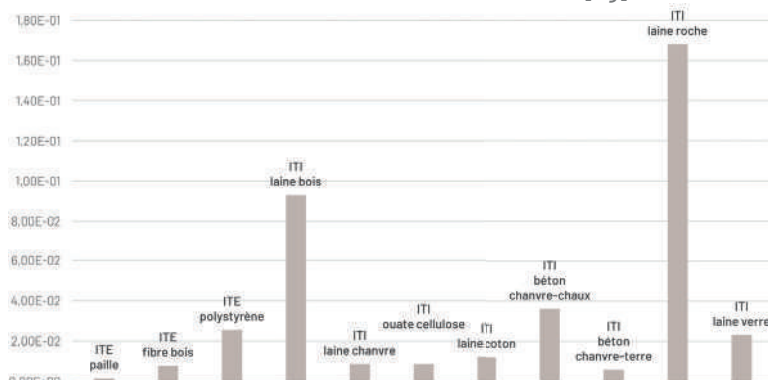
L'impact de l'ITI béton de chanvre-chaux se démarque, probablement du fait du processus de fabrication de la chaux et de la quantité de matière nécessaire pour atteindre la résistance thermique souhaitée.

ACV - Déchets dangereux éliminés [kg]



L'impact de l'ITE polystyrène expansé se distingue nettement des autres matériaux et peut être lié à l'origine du polystyrène ; il est en effet issu du pétrole.

ACV - Déchets radioactifs éliminés [kg]



L'impact de l'ITI laine de roche est largement prépondérant par rapport aux autres matériaux.

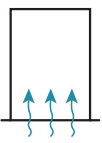
CONCLUSION :

La prise en compte d'indicateurs multiples complexifie l'analyse globale et ne permet pas d'établir un classement fixe de la solution la plus impactante à la moins impactante. On peut cependant conclure que les complexes d'isolation biosourcés, à l'exception du béton de chanvre-chaux, se distinguent très nettement des complexes standardisés, notamment la paille, pour laquelle tous les impacts sont parmi les plus faibles. Aussi, le béton de chanvre-terre présente un intérêt particulier, puisqu'utiliser la terre et non la chaux comme liant peut réduire drastiquement l'impact de l'isolant, voire inverser la tendance comme pour l'impact carbone.

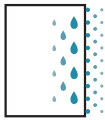
Note : Ce document est indissociable de la « Fiche généralités n°1 », qui liste les définitions et hypothèses principales nécessaires, et de la « Fiche généralités n° 2 », qui détaille l'analyse du cycle de vie des complexes d'isolation comparés.

COMPORTEMENT HYDRIQUE

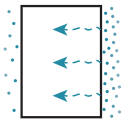
CARACTERISTIQUES DU BETON :



TRES FAIBLE CAPILLARITE
 $A_{w\text{ béton}} = 0,0067 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$



FORTE HYGROSCOPICITE
 $w_{80\text{ béton}} = 85 \text{ kg}/\text{m}^3$

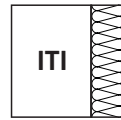


FORTE RESISTANCE A LA VAPEUR D'EAU
 $\mu_{\text{béton}} = 180, S_{d\text{ béton}} = 36 \text{ m}$ (pour 20 cm)

COMPLEXES D'ISOLATION APPLICABLES :



- Tous les complexes d'isolation peuvent être mis en œuvre sur un voile béton.



- L'isolant doit être ouvert à la vapeur d'eau et les doublages collés (type PSE) sont à proscrire.
- Une membrane hygrovariable est à privilégier.
- L'aménagement d'un vide technique en amont du parement intérieur protégé la membrane.



Il faut être particulièrement vigilant-e si l'enduit extérieur existant est en ciment. S'il est en mauvais état / humide, il faut le retirer avant d'isoler.

PERFORMANCES THERMIQUES

Pour certaines grandeurs, plusieurs complexes d'isolation donnent des résultats similaires, voire égaux. Ils ont ainsi pu être regroupés en trois catégories :

ITE : Paille, fibre de bois et polystyrène expansé

ITI 1 : Laines de bois, chanvre, mouton, coton, roche, verre et ouate de cellulose

ITI 2 : Béton de chanvre-chaux et béton de chanvre-terre

INCONFORTS HIVERNAL ET ESTIVAL :

INCONFORT HIVERNAL - BESOINS DE CHAUFFAGE B_{chauf} [kWh/m²]:

A l'état existant sans isolation, on a $B_{\text{chauf}} = 279,48 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Voici les besoins de chauffage obtenus pour chaque complexe d'isolation et pour chacune des variantes sur murs isolés :

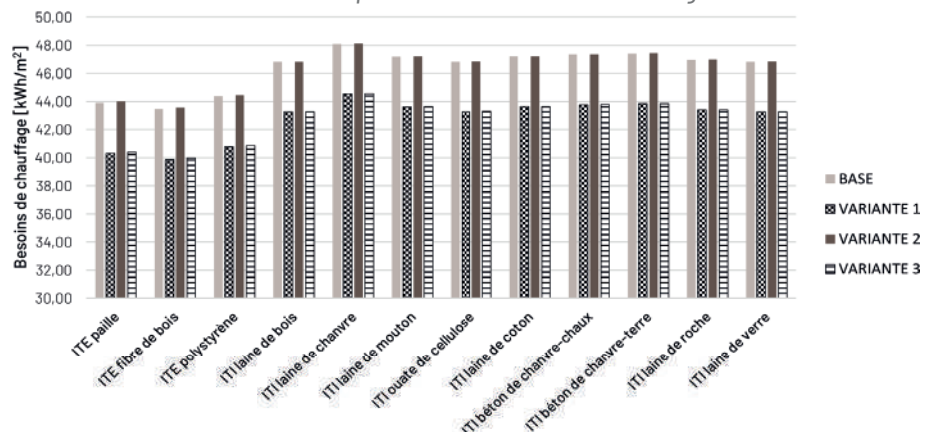
ISOLATION DU BATIMENT :

- L'isolation du bâtiment (base) permet de réduire drastiquement les besoins de chauffage. En moyenne, on a -84 % pour les ITE et -83 % pour les ITI par rapport à l'état existant.

VARIANTES D'AMELIORATION :

- En plus de l'isolation, l'occultation des vitrages (var. 1 et 3) permet de réduire les déperditions thermiques par les vitrages et améliore donc légèrement les besoins de chauffage. En moyenne, on a -86 % pour les ITE et -85 % pour les ITI par rapport à l'état existant.

Voile béton - Comparaison des besoins de chauffage



INCONFORT ESTIVAL - DEGRE-HEURES D'INCONFORT DH [°C.h] :

A l'état existant sans isolation, on a $DH = 438,97$ °C.h. Voici les degré-heures d'inconfort obtenus pour chaque complexe d'isolation et pour chacune des variantes sur murs isolés :

ISOLATION DU BATIMENT :

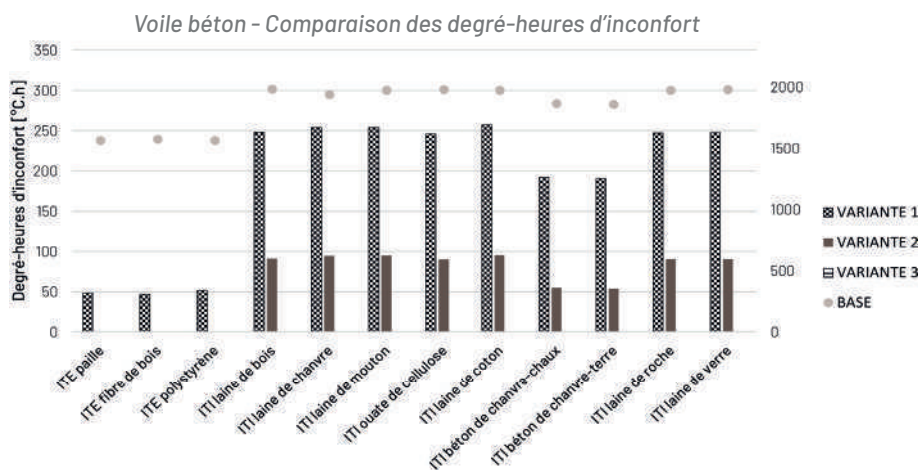
• L'isolation du bâtiment (base, axe de droite) augmente les degré-heures et génère un inconfort excessif, avec 1250 °C.h $\leq DH$. En moyenne, on a +260 % pour les ITE, +350 % pour les ITI 1 et +325 % pour les ITI 2 par rapport à l'état existant.

VARIANTES D'AMELIORATION :

• Toutes ces variantes (axe de gauche) respectent le critère de confort $DH \leq 350$ °C.h.
• L'occultation des vitrages (var. 1) réduit fortement les DH. En moyenne, on a -89 % pour les ITE, -43 % pour les ITI 1 et -56 % pour les ITI 2 par rapport à l'état existant.

• La surventilation naturelle nocturne (var. 2) réduit encore davantage les DH. En moyenne, on a -99 % pour les ITE, -79 % pour les ITI 1 et -88 % pour les ITI 2 par rapport à l'état existant.

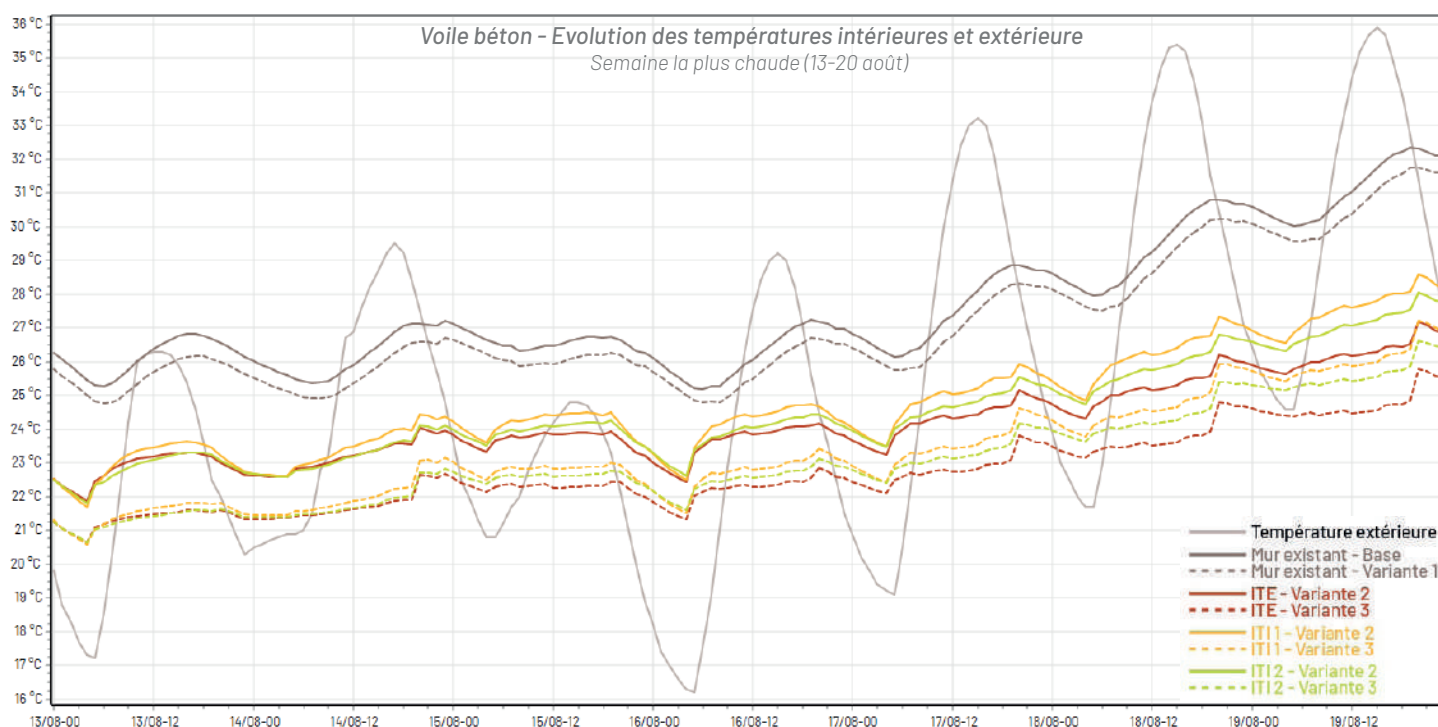
• Enfin, la combinaison des deux (var. 3) est la variante la plus performante. En théorie, elle permet de réduire de près de 100 % les degré-heures d'inconfort pour tous les complexes d'isolation par rapport à l'état existant.



DEPHASAGE ET AMORTISSEMENT THERMIQUES :

COURBES DE TEMPERATURES :

Le graphique montre l'évolution des courbes de températures pour certaines variantes durant la semaine la plus chaude :



ATTENTION : Les déphasage et amortissement thermiques sont à calculer pour une paroi complète et non à l'échelle d'un unique matériau. Leurs valeurs varient majoritairement en fonction du type de mur de structure et des emplacements (ITE ou ITI) et propriétés de l'isolant ; elles ne sont donc pas des arguments de choix.

CONCLUSIONS



- Les performances thermiques des isolants permettent uniquement de distinguer les groupes ITE, ITI 1 et ITI 2.
- La différence majeure entre tous les complexes d'isolation est leur impact environnemental.
- **ATTENTION :** Un autre argument de différenciation est le comportement au feu des complexes d'isolation.

CONCLUSION

Dans un contexte de crise environnementale, la rénovation du parc bâti existant et l'utilisation de matériaux biosourcés ont été identifiés comme leviers d'action majeurs pour réduire les impacts du secteur de la construction, qui fait partie des plus polluants, tant à l'échelle française que mondiale. Leur démocratisation se heurte cependant à une méconnaissance et un manque d'information et de vulgarisation de productions scientifiques pour tous les publics. Ainsi, l'objectif principal de ce PFE était double. D'une part, il s'agissait d'étudier et de confronter des complexes isolants, applicables en rénovation de murs extérieurs de maisons individuelles dans la région Grand Est. Ces complexes devaient mettre en œuvre des matériaux issus de filières biosourcées et géosourcées majoritairement locales, ainsi que des matériaux « traditionnels » pour comparaison. D'autre part, le but final était de concevoir une valorisation de cette étude en outils pédagogiques, pour sensibiliser et informer des cibles diverses, allant du grand public aux professionnel-le-s de la construction. Le PFE s'est ainsi organisé en trois temps. Une première étape a permis de définir une méthodologie de projet, de choisir les complexes d'isolation et paramètres à étudier et de formuler les hypothèses principales de l'étude. Dans un second temps, la définition de principes fondamentaux et l'explicitation des spécificités et points de vigilances des types de bâti et d'isolation a abouti à la conception des parois et à la réalisation de l'étude, s'intéressant aux aspects hydriques, thermiques et environnementaux. Enfin, la troisième partie visait à l'aboutissement du projet via la conception des outils pédagogiques attendus. Ce processus a mis en avant l'importance des deux premières parties dans le choix des outils à réaliser, qui a évolué au fil de l'étude en fonction de l'avancée de la démarche et des résultats obtenus. En effet, la réalisation d'outils de vulgarisation nécessitait d'effectuer une étude approfondie, permettant de cadrer le propos via des hypothèses précises et de cerner les propriétés et conclusions clés.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de l'étude multicritère réalisée. Premièrement, il est essentiel de commencer un projet de ce type par l'analyse de la **gestion de l'humidité** des parois, car c'est le **comportement hydrique** des matériaux qui détermine si un assemblage est possible ou non, et si oui avec quelles précautions. Du fait des matériaux qui les composent, une distinction est notamment à faire entre le bâti ancien, considéré comme un système « ouvert » et donc sensible à l'eau, et le bâti moderne, considéré à l'inverse comme un système « fermé », peu voire pas sensible. Le choix du système d'isolation thermique influence également la pérennité de la paroi, puisqu'il a une influence sur la vulnérabilité, ou non, du mur structurel au gel et à la pluie et sur les risques de condensation par point de rosée au sein de la paroi.

En outre, l'étude des propriétés et la réalisation de simulations thermiques ont dégagé deux concepts essentiels, que sont le **confort estival** et l'**inertie thermique** d'un bâtiment. Tout d'abord, le **confort estival** constitue un réel enjeu. C'est une problématique particulière qui n'est pas systématiquement étudiée, alors qu'elle est en réalité indispensable pour assurer la viabilité d'un bâtiment, d'autant plus dans le contexte de réchauffement climatique actuel. En effet, si isoler thermiquement un bâtiment, en plus de s'assurer de la présence d'un système de ventilation performant, est primordial pour améliorer le confort thermique hivernal et réduire ainsi les consommations énergétiques liées au chauffage, l'étude montre que cette action entraîne inévitablement une détérioration importante de la situation estivale. L'application de scénarios d'occultation des vitrages et de surventilation naturelle nocturne permet de réduire drastiquement cet inconfort. Bien qu'ils soient théoriques dans cette étude, leurs impacts n'en restent pas moins colossaux et justifient de leur pertinence dans une stratégie globale de confort thermique et de réduction des consommations d'énergie. En parallèle, l'**inertie thermique** est un concept majeur, mais trop souvent réduit aux simples déphasages et amortissements thermiques de matériaux isolants, pour lequel il faut rigoureusement distinguer l'**inertie de transmission** et l'**inertie intérieure ou d'absorption** ; la première appellation est caractérisée par les déphasage et amortissement thermiques, tandis que la seconde est dépendante de l'effusivité thermique. L'étude réalisée révèle d'une part que ces notions de déphasage et amortissement sont certes importantes, mais ne peuvent pas être réduites à un matériau seul et doivent impérativement être calculées à l'échelle d'une paroi complète ; elles dépendent en effet du matériau de structure utilisé et des emplacement et propriétés de l'isolant et ne constituent donc pas un argument de choix entre tous les isolants. D'autre part, l'inconfort estival est directement impacté par l'effusivité thermique du matériau (structure ou isolant) le plus proche de l'ambiance intérieure, puisque plus sa valeur est grande, moins les degré-heures d'inconfort sont importants. Ce principe explique en quoi les bétons de chanvre, avec liant chaux ou terre, sont particulièrement intéressants en ITI, par rapport aux laines et vracs, pour améliorer le confort thermique estival.

Enfin, le contrôle des **performances environnementales** des complexes d'isolation, via une ACV, a permis de réellement distinguer les complexes les uns des autres. Dans cette étude, le choix a été fait de ne pas se limiter

à l'évaluation de l'impact sur le réchauffement climatique, mais d'élargir l'ACV à d'autres indicateurs, afin d'obtenir une analyse plus globale des conséquences environnementales des matériaux utilisés. La confrontation de ces divers indicateurs a mis en avant l'avantage que représentent les solutions biosourcées, notamment la paille, par rapport aux solutions industrialisées, en ayant des impacts globalement bien plus faibles dans divers domaines. Une exception est cependant faite sur le béton de chanvre-chaux, car le recours à la chaux en grande quantité rend ce matériau assez polluant ; le remplacement de la chaux par la terre en liant améliore très fortement ses impacts et place le béton de chanvre parmi les solutions les plus vertueuses. Le polystyrène expansé, qui est la solution la plus courante dans le secteur de la construction, fait quant à lui partie des matériaux ayant un impact global le plus défavorable. Les résultats de l'ACV sont cependant influencés par les normes et types de FDES utilisées et par les hypothèses de calculs des impacts considérées.

Il est important de préciser que chaque cas concret est un cas particulier, qui nécessite un diagnostic préalable et une étude spécifique. Aussi, ce PFE s'est attaché à l'étude du comportement hydrique, des performances thermiques et de l'impact environnemental des complexes. Il pourrait néanmoins être pertinent d'élargir l'étude à d'autres critères très variés. On retrouve par exemple la caractérisation des ressources nécessaires pour fabriquer les matériaux, allant de leur origine à leurs fréquence et vitesse de renouvellement, l'évaluation de la réversibilité des matériaux finis, l'impact des contraintes urbanistiques, patrimoniales, de conservation de la surface habitable ou de l'occupation du site pendant les travaux sur les possibilités d'intervention, etc. De plus, l'étude poussée de la question financière serait intéressante, pour déterminer une fourchette de prix pour chaque matériau et complexe isolant, incluant la fourniture et la pose, ainsi que les paramètres influençant les prix. En effet, le coût dépend par exemple du type de projet, du lieu d'intervention, des matériaux, ressources, entreprises et savoir-faire disponibles localement, et donc plus largement de la structuration des filières et de l'état de démocratisation des pratiques constructives et matériaux utilisés. Aussi, certains matériaux, notamment les biosourcés et géosourcés, seraient bénéfiques en favorisant le développement d'une économie locale et d'emploi locaux non délocalisable. Enfin, la mise en perspective de certaines performances des matériaux serait appropriée, telle que l'impact du changement d'état de l'eau, lié à l'hygroscopicité du matériau, sur le confort hygrothermique. A titre d'exemple, des études réalisées à ce sujet sur le béton de chanvre-chaux montre que l'énergie générée par ce changement d'état permet de réduire les consommations énergétiques de chauffage d'un bâtiment isolé par l'intérieur avec ce matériau, bien que sa conductivité thermique soit élevée et qu'il soit donc théoriquement moins performant que d'autres isolants. Appliquer ce type d'études à d'autres matériaux et paramètres permettrait donc d'accroître notre compréhension des liens entre phénomènes physiques et performances des composants et d'élargir nos conceptions actuelles.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] USGCRP, 2017: *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp.36-37, doi: 10.7930/J0J964J6
- [2] *Accord de Paris*, Paris, 12 décembre 2015, Nations Unies, Recueil des Traités, vol. 3156, no. 54113, pp. 170-171, accessible à l'adresse https://treaties.un.org/Pages/showDetails.aspx?objid=0800000280458f37&clang=_fr
- [3] Convention-cadre sur les changements climatiques, *Dialogue technique au titre du premier bilan mondial*, FCCC/SB/2023/9 (8 septembre 2023). p. 4. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sb2023_09F.pdf
- [4] GlobalABC. (2022). *Rapport sur l'état mondial des bâtiments et de la construction en 2022 : Vers un secteur des bâtiments et de la construction à émission zéro, efficace et résilient*. p. 4. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/41134/Building_Construction_2022_ESFR.pdf?sequence=10&isAllowed=y
- [5] IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. p. 105. IPCC, Geneva, Switzerland, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- [6] Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires. (2023, 20 mars). *Publication du 6e rapport de synthèse du GIEC*. MTECT et MTE. Consulté le 18/12/2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec>
- [7] Rapport de l'OPECST n° 129, Sénat, n° 501, Assemblée nationale (2022) « *Rapport au nom de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur la rénovation énergétique des bâtiments : Piloter, encourager et accélérer la rénovation énergétique des bâtiments* ». pp. 7-9+17. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/rapports/ots/l16b0_501_rapport-information#
- [8] Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires. (2022). *Bilan 2018 de la production de déchets en France*. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-06/datalab_essentiel_249_bilan_2018_dechets_juin2021.pdf
- [9] Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires. (2021, 12 avril). *Matériaux de construction biosourcés et géosourcés*. Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires. Consulté le 21/12/2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/materiaux-construction-biosources-et-geosources>
- [10] CODEM-Le BATLAB. (2021). *Guide la rénovation de parois à l'aide de matériaux biosourcés*. pp. 14 + 21-22. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-etbatiment/4451-guide-de-la-renovation-de-parois-a-l-aide-de-materiaux-biosources.htm>
- [11] Hellio. (2023). *Les freins à la rénovation globale d'un logement : quelles solutions ?*. Consulté le 21/12/2023. <https://www.hellio.com/actualites/evenements/renovation-globale-cout-aides-freins>
- [12] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Ministère de la Cohésion des Territoires et des Relations avec les Collectivités Territoriales. (s. d.). *Les matériaux de construction biosourcés & géosourcés*. p. 2. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/les_materiaux_de_construction_biosources_geosources.pdf

- [13] Art. 14 de la Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (JORF n°0189 du 18 août 2015). Consulté le 21/12/2023. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXTO00031044385/2021-01-10/>
- [14] Art. 181 de la Loi n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (JORF n°0272 du 24 novembre 2018). Consulté le 21/12/2023. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFARTI000037639713>
- [15] Envirobat BDM, Apave. (2022). *Guide Technique des matériaux biosourcés & géosourcés. A l'usage des acteurs de la construction*. pp. 5+6. http://www.envirobatbdm.eu/sites/default/files/2022-03/2202_guide_mbs_bc_evbdm_apave_v1_0.pdf
- [16] ADEME. (2017). *Enquête TREMI. Travaux de Rénovation Énergétique des Maisons Individuelles. Campagne 2017*. p. 12. https://data.ademe.fr/data-fair/api/v1/datasets/tremi-2017-resultats-bruts/metadata-attachments/TREMI_2017_brochure_synthese.pdf
- [17] TREMI. (s. d.). *Enquête TREMI 2020. Nombre et coût des gestes réalisés*. TREMI. Consulté le 22/12/2023. <https://tremi.fr/>
- [18] Equipe AQC. (2020, 1er avril). *Isolants biosourcés, techniques chantier et prescription : un retour d'expérience*. Construction 21. Consulté le 22/12/2023. <https://www.construction21.org/france/articles/h/Dossier-biosourcés-retour-experience-techniques-chantiers-prescription-maitrise-oeuvre-AQC.html>
- [19] Larousse. (s. d.). Absorption. Dans *Dictionnaire en ligne*. Consulté le 12/01/2024. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/absorption/285>
- [20] Association Arcanne. (2020). *Glossaire « Humidité »*. <https://associationarcanne.files.wordpress.com/2022/02/glossaire-humidite-2022.02.pdf>
- [21] INIES. (s. d.). *Glossaire*. Consulté le 06/01/2024. <https://www.inies.fr/ressources-documentaires/glossaire/#glossaire-1809>
- [22] CEREMA. (2021). *ACV dynamique, comprendre les FDES et les opportunités pour améliorer la qualité environnementale des projets*. p. 11. <https://www.envirobatgrandest.fr/wp-content/uploads/presentation-cerema-re2020-materiaux-biosources.pdf>
- [23] INIES. (s. d.). *Qu'est-ce qu'une donnée environnementale par défaut (DED) ?*. INIES. Consulté le 06/01/2024. <https://www.inies.fr/faq/quest-ce-quune-donnee-environnementale-par-defaut-ded/>
- [24] Verschaere, A. (2016, 22 mai). *Les 3 modes de transfert thermique*. Consulté le 02/01/2024. <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>
- [25] Eguienta, J., Phan, C. (2023). *Datalab. Chiffres clés des énergies renouvelables*. p. 94. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2023/livre>
- [26] INIES. (s. d.). *FDES (Produits de construction)*. Consulté le 06/01/2024. <https://www.inies.fr/inies-et-ses-donnees/fdes-produits-de-construction/>
- [27] Code de l'environnement, art. L541-1-1. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000023248311/2020-02-12
- [28] AQC. (2022). *Bâtiment : Bien utiliser les textes de références*. p. 2. <https://qualiteconstruction.com/wp-content/uploads/2022/03/pt-batiment-bien-utiliser-textes-reference-aqc.pdf>
- [29] AQC. (s. d.). *Pôle prévention produits*. AQC. Consulté le 04/01/2024. <https://qualiteconstruction.com/aqc/nos-missions/pole-prevention-produits/>

- [30] L'Auxiliaire BTP. (2019, 16 février). *Domaine traditionnel, technique courante, quelle différence ?*. L'Auxiliaire BTP. Consulté le 03/01/2024. <https://www.auxiliaire.fr/article/domaine-traditionnel-technique-courant-e-quelle-difference>
- [31] Enertech pour Oktave et le programme Climaxion de la Région Grand Est et de l'ADEME, RIESER, T., BOISSONNEAU, T., MOTEAU, S. (2017). *Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien*. <https://www.enertech.fr/migration-dhumidite-et-de-vapeur-dans-les-parois-du-bati-ancien-2/>
- [32] CEREMA de l'Est, ENSA Toulouse, LMDC de l'INSA Toulouse et MPF pour le Ministère de l'Ecologie et du développement Durable. (2013). *HYGROBA : Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes*. <https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/espace-documentaire/hygroba-etude-la-rehabilitation-hygrothermique-des-parois-anciennes>
- [33] CEREMA et Atelier ODM SARL d'architecture pour les anciennes DREAL Alsace et DRAC Alsace. (2014-2015). *Habitat ancien en Alsace*. Accessible à l'adresse <https://www.culture.gouv.fr/Regions/DRAC-Grand-Est/aides/fiches-conseils-udap/Bas-Rhin-et-Haut-Rhin/Etude-Habitat-ancien-en-Alsace-amelioration-energique-et-preservation-du-patrimoine>
- [34] DREAL Grand Est, CEREMA Est. (2019). *Bien rénover mon logement en Lorraine*. Accessible à l'adresse suivante : <https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/bien-renover-mon-logement-en-lorraine-fiches-a19025.html>
- [35] Envirobot Grand Est ARCAD-LQE dans le cadre du SRCAE et du PREH. (2017). *Le bâti ancien Champardennais*. Accessible à l'adresse <https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/guide-du-bati-ancien-champardennais-a17853.html>
- [36] Art. 3 de l'Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants (JORF n°114 du 17 mai 2007). Consulté le 06/01/2024. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000822199>
- [37] MTECT, MTE. (2023, 28 décembre). *Coup de pouce « Rénovation d'ampleur des maisons et appartements individuels »*. MTECT et MTE. Consulté le 02/01/2024. <https://www.ecologie.gouv.fr/coup-pouce-renovation-dampleur-des-maisons-et-appartements-individuels>
- [38] Art. 2 de l'Arrêté du 3 octobre 2023 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label prévu à l'article R. 171-7 du code de la construction et de l'habitation (JORF n°0237 du 12 octobre 2023). Consulté le 06/01/2024. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT_000048193328
- [39] La Maison Passive. (2019). *Critères pour la labellisation Bâtiment Passif, EnerPHit et BaSE*. p. 7. <https://www.lamaisonpassive.fr/wp-content/uploads/2021/05/CriteresDeCertification-mai-2021.pdf>
- [40] PACTE. (2021). *Guide : Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiment*. pp. 20+27-29+35+36. <https://www.proreno.fr/pdf?file=https://api.proreno.fr/storage/media/shares/pdf/00359/gsimhubatoc21222web.pdf&id=287&page=1&title=D%C3%A9termination+des+hypoth%C3%A8ses+pour+les+simulations+de+transferts+coupl%C3%A9s+temp%C3%A9rature+humidit%C3%A9+dan>
- [41] ONERC. (2015). *GIEC : Scénarios d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre*. p. 2. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Fiche_scenarios_evolution_GES_GIEC.pdf
- [42] Carpentier, C. pour la MDF. (2011). *L'humidité dans les bâtiments*. p. 3. <https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/modules/catalogue/pdf/45/t22-l-humidite-dans-les-batiments.pdf>
- [43] Courgey, S. (2024, 9 janvier). *Humidité dans les parois* [Diapositives]

- [44] CSTB. (2000). *Conductivité thermique des matériaux*. p. 6. <http://fee.ales.free.fr/telechargement/rt2000/regthermiqueRT2000/Th-U-2.pdf>
- [45] Ben Yahmed, A. (2023, 27 novembre). *Formation des ambassadeurs des matériaux biosourcés : Tour d'horizon des matériaux biosourcés : Quelles performances ?* [Diapositives]
- [46] Wufi Wiki. (2009, 25 mars). *Details:WaterVaporDiffusion*. Consulté le 15/01/2024. <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:WaterVaporDiffusion>
- [47] An. (s. d.). *ISO 12572:2016(fr). Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment*. Consulté le 15/01/2024. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12572:ed-2:v1:fr>
- [48] Rénov'ACT initié par Ajena. (s. d.). *Fiches techniques : Humidité dans les logements*. pp. 8-11. https://www.ajena.org/renovact/media/technique_humidite.pdf
- [49] Rode, C. (Ed.), Peuhkuri, R. H., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Arfvidsson, J., & Harderup, L-E. (2005). *Moisture Buffering of Building Materials*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. BYG Report No. R-127 <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/2415500/byg-r126.pdf>
- [50] Anh Dung Tran Le. *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment* (sous-titre: simulation numérique et approche expérimentale). Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Reims - Champagne Ardenne, 2010. Français. NNT : tel-00590819v1. <https://theses.hal.science/tel-00590819v1/document>
- [51] Viel, M., Collet, F., Lanos, C. (2018). *Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material*. pp. 217+225. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>
- [52] Wufi Wiki. (2013, 13 juin). *Details:MoistureStorageFunction*. Consulté le 21/01/2024. <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:WaterVaporDiffusion>
- [53] RAGE. (2013). *Evaluation des risques de pathologies liés à l'humidité*. p. 18. Accessible à l'adresse : <https://www.proreno.fr/documents/evaluation-des-risques-de-pathologies-liees-a-lhumidite-au-niveau-des-poutres-encastrees-dans-un-mur-exterieur-isole-par-linterieur>
- [54] Wufi Wiki. (2013, 13 juin). *Details:LiquidTransportCoefficients*. Consulté le 21/01/2024. <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:LiquidTransportCoefficients>
- [55] Summers, M.D., Blunk, S.L., Jenkins, B.M. (2003). *How Straw Decomposes : Implications for Straw Bale Construction*. p. 2. https://ecobuildnetwork.org/images/straw_bale_papers/How_Straw_Decomposes_Summers_et_al_2003.pdf
- [56] Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires. (2017). *Règles Th-bat – Parois opaques*. p. 14. https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/4-fascicule_parois_opaques_methodes.pdf
- [57] Oliva, J.-P., Courgey, S. (2023). *L'isolation thermique écologique* (édition 2023). Terre Vivante. pp. 46-48+56
- [58] Fabio Munaretto. *Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments*. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014. Français. pp. 3+28. (NNT : 2014ENMP0011). (pastel-01068784)

- [59] Loyal Chahwane. Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Grenoble, 2011. Français. pp. 2+9+10+66. (NNT : 2011GRENA017). (tel-00701170)
- [60] Pupille, J.-M. (2022, 18 juillet). 6-3 - *Comprendre l'inertie thermique, la diffusivité, l'effusivité et leurs incidences sur le confort*. Passiv Act. Consulté le 29/02/2024. <https://passivact.fr/Concepts/files/InertiesThermiques-Comprendre.html>
- [61] Zürcher, C., Frank, T. (2014). *Physique du bâtiment. 2.2 Stockage de chaleur*. Enbau online. Consulté le 29/02/2024. <https://enbau-online.ch/bauphysik/fr/2-2-stockage-de-chaleur/>
- [62] Effinergie. (2012). *Inertie thermique int. Capacité thermique*. https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/1370/Inertie_thermique.pdf
- [63] Pupille, J.-M. (2016, 22 décembre). 6-6 - *Inertie thermique et ventilation*. Passiv Act. Consulté le 29/02/2024. <https://passivact.fr/Concepts/files/InertiesThermiques-Comprendre.html>
- [64] An. (2017). *Règles Th-bat – Fascicule Inertie*. p. 3. https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/6_-fascicule_inertie_methodes.pdf
- [65] Ministère de la Transition Ecologique. (2024). *Guide RE2020. Eco-construire pour le confort de tous*. pp. 5+11. https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_re2020_version_janvier_2024.pdf
- [66] CEREMA. (2023, 24 août). *Déclarations environnementales : Décryptage de la norme NF EN 15804 + A2/CN et de son complément national*. CEREMA. Consulté le 12/02/2024. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/declarations-environnementales-decryptage-norme-nf-15804>
- [67] Fouquet, M. (2021, 8 février). *ACV dynamique vs ACV statique (1/3) : mais de quoi parle-t-on ?*. Consulté le 14/02/2024. <https://www.construction21.org/france/articles/h/acv-dynamique-vs-acv-statique-1-3-mais-de-quoi-parle-t-on.html>
- [68] Journal officiel électronique authentifié n° 0189 du 15/08/2021. pp. 5+11+57+65+67. https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=LBxKOX3Duk3h0j_ck_WBwvaib6MI9xQU-us85fgyoEk=
- [69] Atheba. (2010). 1/ *Connaissance du bâti ancien. Le comprendre*. p. 1. <https://maisons-paysannes.org/wp-content/uploads/2013/07/ATHEBA-comprendre-le-bati-ancien.pdf>
- [70] Atheba. (2010). 3/ *Interventions à réaliser, à éviter. La ventilation du bâti ancien*. p. 1. <https://maisons-paysannes.org/wp-content/uploads/2013/07/ATHEBA-ventilation-dans-le-bati-ancien.pdf>
- [71] PROFEEL, CSTB. (2021). *Rénostandard : Pavillon de la reconstruction (1948-début des années 70)*. https://programmeprofeel.fr/app/uploads/2022/02/RENOSTANDARD-FICHE_TYPOLOGIE_Pavillons-de-la-reconstruction-1948-debut-des-annees-70.pdf
- [72] Fraunhofer IBP. (s. d.). WUFI® Pro (Version 6.7) [Logiciel]
- [73] WUFI Pro 5.4 Online-Hilfe. (s. d.). *Dialogue : Coefficients de transferts surfaciques*.
- [74] WUFI Pro 5.4 Online-Hilfe. (s. d.). *Dialogue : Conditions initiales*.
- [75] WUFI Pro 5.4 Online-Hilfe. (s. d.). *Dialogue : Structure / positions moniteur*.
- [76] RFCP. (2018). *Règles professionnelles de construction en paille* (Règles CP 2012 révisées, 3ème édition). Le Moniteur. p. 32.

- [77] Fraunhofer IBP. (s. d.). WUFI® 2D (Version 4.5) [Logiciel]
- [78] Carpentier, C. (2009). *Aide à l'utilisation de WUFI pour la simulation dynamique de la diffusion de vapeur dans les parois*. p. 3. <https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/modules/catalogue/pdf/45/aide%20utilisation%20WUFI.pdf>
- [79] WUFI® Forum. (2018, 21 novembre). *Analysis, interpretation and assessment of the calculation results*. WUFI® Forum. Consulté le 09/02/2024. <https://www.wufi-forum.com/viewtopic.php?t=1623>
- [80] WIHAN, J. (2007). *Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw* [Thèse de doctorat, University of East London School of Computing and Technology]. p. 55. <https://tallerconco.org/wp-content/uploads/2017/05/Thesis-Humidity-In-Straw-Bale-Walls-Jakub-Wihan.pdf>
- [81] WUFI Pro 5.4 Online-Hilfe. (s. d.). *Dialogue : Infos : Dernière opération de calcul*.
- [82] WUFI Pro 5.4 Online-Hilfe. (s. d.). *Dialogue : Graphique rapide*.
- [83] Izuba. (s.d.) Pleiades (Version 6.24.1.2) [Logiciel]
- [84] INSEE. (2021, 29 avril). *La France et ses territoires*. INSEE. Consulté le 03/01/2024. https://www.insee.fr/fr/statistiques/5039855?sommaire=5040030#figure3_radio3
- [85] Energie Plus. (2014, 30 janvier). *Norme NBN EN 15251 : 2007 : Critères d'ambiance intérieure*. Energie Plus. Consulté le 09/02/2024. <https://energieplus-lesite.be/reglementations/confort44/norme-nbn-en-15251-2007-criteres-d-ambiance-interieure/>
- [86] Service Public. (2021, 20 décembre). *A quelle température doit être chauffé un logement ?*. Service Public. Consulté le 09/02/2024. <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F32563>
- [87] Microsoft. (s. d.). Microsoft Excel (Version 365) [Logiciel]
- [88] RT-RE Bâtiment. (2023, 12 mai). *FAQ RE2020 88 - Peut-on modifier la quantité d'un produit pour s'adapter à l'unité fonctionnelle d'une donnée environnementale ?*. RT-RE Bâtiment. Consulté le 15/02/2024. <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/faq-re2020-88-peut-on-modifier-la-quantite-d-un-a709.html>
- [89] Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. (2014). *Liste des indicateurs*. pp. 4-5. https://www.inies.fr/wp-content/uploads/2021/06/liste_des_indicateurs_declaration_environnementale_mars_20141.pdf

LISTE DES DOCUMENTS ANNEXES

- Annexe 1 : Dispositifs pour la rénovation énergétique
- Annexe 2 : Réglementations, labels et certifications
- Annexe 3 : Liste des référent·e·s
- Annexe 4 : Etude des ATec et DTA
- Annexe 5 : Scénarios RCP du GIEC
- Annexe 6 : Prérequis et sources associées
- Annexe 7 : Isotherme de sorption
- Annexe 8 : Formules du déphasage thermique
- Annexe 9 : Méthode des admittances
- Annexe 10 : Sources des données des matériaux
- Annexe 11 : Sources pour l'analyse des résultats des logiciels
- Annexe 12 : WUFI® Pro et WUFI® 2D – Autres résultats
- Annexe 13 : Pleiades – Autres résultats
- Annexe 14 : Coupes de mise en œuvre
- Annexe 15 : Outils pédagogiques – Autres fiches
- Annexe 16 : Fiches de suivi