

Construire en pierre dans un climat tempéré

Les principes bioclimatiques et les outils numériques au service de la conception d'une architecture en pierre naturelle localisée et durable

Mémoire de Master

Concevoir et Construire l'Architecture

Séminaire Savoirs des Activités de Projet Instrumentées

Aurélien DUFLO



Encadré par Joaquim Silvestre & Anne Tuscher

Résumé :

La pierre est aujourd'hui sujette à de nombreux doutes quant à son efficacité thermique. Si ses caractéristiques physiques ne lui confèrent pas un bon pouvoir isolant, elle possède en revanche d'autres qualités souvent négligées dans les évaluations classiques par simulations énergétiques. Comment optimiser le confort hygrothermique lors de la conception d'une maison en pierre naturelle dans un climat tempéré à l'aide de méthodes de conception bioclimatique et de simulations énergétiques ?

La forme construite du bâtiment, l'orientation des ouvertures ou encore la composition des parois sont autant de solutions possibles, mais souvent abordées de manière isolée. Or, la conception architecturale dans son ensemble, en tant qu'étape décisive dans la performance énergétique passive, constitue le principal levier d'optimisation.

Ce travail propose donc une méthode de conception adaptée à la pierre, tenant compte de la localisation du projet, et reposant sur trois piliers interconnectés : l'analyse de l'architecture vernaculaire locale pour en extraire des principes pertinents ; la simulation hygrothermique à l'échelle de la paroi pour en définir la composition optimale ; et la simulation énergétique de la proposition architecturale afin d'en évaluer les performances globales.

Ce processus vise à identifier les éléments optimaux pour atteindre le confort thermique dans une maison en pierre naturelle, et à réaffirmer la pertinence de ce matériau dans une approche bioclimatique en France.

Mots-clés : Optimisation énergétique, Pierre Naturelle, Confort thermique, Solution passive, Architecture bioclimatique.

Abstract :

Stone is today subject to considerable doubt regarding its thermal performance. While its physical properties do not provide strong insulation, it possesses other qualities often overlooked in conventional energy simulation assessments. How can hydrothermal comfort be optimised when designing a natural stone house in a temperate climate using bioclimatic design methods and energy simulations?

The shape of the building, the orientation of the openings and the composition of the walls are all possible solutions, but they are often addressed in isolation. However, architectural design as a whole, as a decisive step in passive energy performance, is the main lever for optimisation.

This study proposes a design method suited to stone construction, tailored to the project's location, and based on three interconnected pillars: the analysis of local vernacular architecture to extract relevant design principles; hygrothermal simulation at the wall scale to define its optimal composition; and whole-building energy simulation to evaluate overall performance.

This process aims to identify the optimal elements required to achieve thermal comfort in a natural stone house, and to reaffirm the relevance of this material within a bioclimatic design approach in the French context.

Key-words: Energy optimisation, Natural Stone, Thermal Comfort, Passive solution, Bioclimatic Architecture.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des personnes et institutions ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie tout particulièrement les enseignants de la NTNU pour la qualité de leur enseignement et leur introduction approfondie à la conception bioclimatique, notamment Luca Finocchiaro, Bunji Izumi et Anschuman Abhisek Mishra. Je remercie également la NTNU pour l'accès à ses ressources documentaires ainsi qu'au logiciel Rhino, qui ont constitué un appui essentiel durant la première année de travail sur ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à Tristan Pestre pour sa thèse sur les transferts hygrométriques, qui m'a permis d'approfondir significativement ma compréhension du sujet, ainsi que pour les valeurs de référence que j'ai pu réutiliser dans ce travail. Les colloques et événements consacrés à la pierre, notamment ceux organisés par le Pavillon de l'Arsenal, ont également constitué une source précieuse de connaissances, au même titre que le CTMNC pour la mise à disposition de ses données et publications spécialisées.

Je remercie par ailleurs WUFI pour l'acceptation de ma demande de licence, Joaquim Silvestre et Anne Tuscher pour leur suivi, ainsi que Clément Trouche, professeur de thermique à l'EIVP, pour la clarté et la pertinence de ses réponses à mes questions techniques.

Enfin, je souhaite remercier chaleureusement ma mère pour son soutien constant tout au long de ce parcours, ainsi que mes camarades, dont les échanges, l'entraide et les encouragements ont largement contribué à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Glossaire	7
1 Introduction	11
2 Exposition du sujet	13
2.1_ Exposition générale	15
2.2_ Intérêt de recherche.....	16
2.3_ Problématique et hypothèses	18
2.4_ Méthode de recherche générale.....	19
3 État de l'art des connaissances	21
3.1_ Les prémices de la forme et des solutions passives : l'architecture vernaculaire en réponse au climat tempéré en France	23
3.1.1_ <i>L'architecture bioclimatique</i>	23
3.1.2_ <i>L'architecture vernaculaire</i>	30
3.1.3_ <i>Un zoom sur la France</i>	32
3.2_ Les transferts hygrothermiques dans une paroi en pierre naturelle	41
3.2.1_ <i>La pierre naturelle en France</i>	41
3.2.2_ <i>La paroi, écran protecteur du monde extérieur</i>	45
3.2.3_ <i>La Pierre : un matériau naturel et complexe</i>	53
3.2.4_ <i>Analyse hygrothermique des matériaux naturels</i>	59
3.3_ Conception architecturale et simulation énergétique	61
3.3.1_ <i>Simulation énergétique</i>	61
3.3.2_ <i>Importance du processus de conception</i>	61
3.3.3_ <i>Analyse énergétique et conception architecturale</i>	63
4 Approche méthodologique et cadre d'étude	65
4.1_ Méthodologie de recueil et d'analyse des données	67
4.1.1_ <i>Des méthodologies existantes sur lesquelles prendre exemple</i>	67
4.1.2_ <i>Logiciels utilisés</i>	71
4.1.3_ <i>Protocole d'analyse</i>	75
4.2_ Définitions des zones et éléments d'étude	79
4.2.1_ <i>Une architecture traditionnelle : échelle régionale</i>	79
4.2.2_ <i>Pierres choisies pour l'analyse</i>	89

5 Expérimentations et analyses	91
5.1_ Les transferts hygrothermiques dans un mur en pierre naturelle.....	93
5.1.1_ Définition des paramètres de simulation.....	93
5.1.2_ Comparaison entre différentes pierres.....	95
5.1.3_ Comparaison entre les différentes orientations de la paroi.....	99
5.1.4_ Comparaison entre différents fruits de la paroi.....	103
5.1.5_ Comparaison entre différentes pierres calcaires disponibles.....	107
5.1.6_ Comparaison entre différentes épaisseurs pour une paroi en pierre calcaire.....	113
5.1.7_ Comparaison entre différentes combinaisons de paroi.....	117
5.1.8_ Isolation par l'extérieur.....	119
5.1.9_ Isolation par l'intérieur.....	123
5.1.10_ Mur double avec cavité d'air.....	127
5.1.11_ Mur double avec remplissage en béton de chanvre.....	131
5.1.12_ Conclusion sur les transferts hygrothermiques à l'échelle de la paroi.....	135
5.2_ Les échanges thermiques dans une maison en pierre naturelle.....	139
5.2.1_ Première analyse à l'aide de l'approche sol-air.....	139
5.2.2_ Définitions des paramètres de simulations des deux zones.....	145
5.2.3_ Maison de l'architecture vernaculaire.....	149
5.2.4_ Forme : possibilités de sol-air.....	153
5.2.5_ Ratio d'ouverture selon l'orientation de la façade.....	157
5.2.6_ Parois verticales.....	159
5.2.6_ Sol et sous-sol.....	163
5.2.7_ Protection solaire fenêtres.....	164
5.2.8_ Pièces avec usages.....	165
5.2.9_ Solutions passives.....	169
5.2.10_ Vernaculaire amélioré.....	173
5.2.11_ Même maison dans l'autre zone.....	175
5.2.12_ Conclusion sur les échanges thermiques dans la maison en pierre naturelle.....	177
 Conclusion générale	 183
 Bibliographie	 189
Table des figures.....	193
Annexes	205
Table des Annexes.....	207

Glossaire

Bioclimatologie : Branche de la biologie qui étudie les échanges de masse et d'énergie entre les êtres vivants et leur environnement climatique.¹

Bioclimatique : Qui concerne l'influence du climat sur les organismes vivants et leurs habitats (relatif à la bioclimatologie). Se dit d'un habitat qui utilise les éléments climatiques naturels pour se chauffer ou se refroidir.

BRGM : Bureau des Recherches Géologiques et Minières

Chaleur spécifique, Cp [J/Kg °K] : Aussi appelée capacité thermique massique ou chaleur massique. C'est la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré, un kilogramme de matériau donné.²

Climat : Le climat représente l'intégration dans le temps d'une condition caractéristique météorologique pour une localisation géographique précise. Il désigne l'ensemble des facteurs météorologiques étudiés sur une longue période permettant d'émettre des données moyennes.

Coefficient de résistance à la vapeur d'eau μ (sans unité) $\mu = \pi_{\text{air}} / \pi_{\text{matériau}}$: Il traduit la façon dont le matériau s'oppose à la migration de la vapeur d'eau. Il est établi par rapport à la progression de la vapeur d'eau dans l'air immobile ($\mu_{\text{air}} = 1$). Un matériau ayant un μ de 30, signifie qu'il résiste 30 fois plus à la diffusion de vapeur d'eau que l'air immobile.³

Coefficient de transmission thermique, U [W/m² °K] : U caractérise la performance thermique d'une paroi. Il est également appelé déperdition thermique surfacique : $U = 1 / R$. Ce coefficient U exprime la conductance de la 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 que sépare cette paroi. Plus la paroi est isolante, moins sa conductance est élevée.⁴

Conduction thermique : La conduction thermique représente l'échange de chaleur qui s'effectue sans déplacement de matière, au sein d'un matériau. L'énergie transmise par conduction dépend de la conductivité du matériau, de la surface de contact avec lequel il échange cette chaleur et de l'épaisseur du matériau.

Conductivité thermique, λ (lambda) [W/m.°K] : C'est la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. Elle est exprimée en W/m°K. Exemple de lambda performant $\lambda = 0,035$ W/m°K.⁵

Convection thermique : La convection thermique est un transfert de chaleur au sein d'un fluide (air ou eau). Ce transfert est caractérisé par le coefficient de transmission thermique par convection propre à chaque fluide.

Confort thermique : 4 paramètres interviennent dans le confort thermique : la température de l'air, la température moyenne des parois, la vitesse de l'air, l'humidité relative de l'air. L'influence de l'humidité est moins évidente ; elle ne se manifeste nettement que si elle devient très élevée ou si la température de l'air est importante.⁶

CTMNC : Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction

Densité : Rapport entre la masse d'un corps et le volume qu'il occupe.

Déphasage thermique, D [h] : Le déphasage thermique correspond au temps que la chaleur met pour traverser un matériau. Le déphasage d'un matériau dépend de son épaisseur et de sa diffusivité thermique.

Diffusivité thermique, a [m²/s] aussi noté D : La diffusivité thermique traduit la vitesse de réponse d'un matériau pour transmettre une variation de température où $a = \lambda / (\rho \cdot Cp)$. (λ : conductivité thermique, ρ : masse volumique, Cp : chaleur spécifique). Plus la diffusivité thermique d'un matériau est faible, et plus celui-ci se réchauffe lentement.⁷

DOLMEN : Développement d'Outils et de Logiciels pour la Maçonnerie Existante et Neuve

Effusivité thermique, E [J/ (°K.m². √s)] : Aussi appelée, chaleur subjective. L'effusivité thermique d'un matériau caractérise la capacité d'un matériau à échanger de la chaleur lors de sa mise en contact avec un autre matériau. Par exemple, en hiver, dans une salle de bain où le temps d'occupation est assez court, les revêtements à faible effusivité thermique, comme le bois augmenteront le confort thermique de la pièce.⁸

¹ www.larousse.fr

² Rénovation Thermique du bâti traditionnel Normand, 2013. Région Basse-Normandie.

³ Ibid.

⁴ Ibid.

⁵ Ibid.

⁶ Ibid.

⁷ Ibid.

⁸ Ibid.

ENAPE : Exploration Numérique de Solutions Architecturales pour la Performance Environnementale.⁹

Enthalpie : Grandeur thermodynamique égale à la somme de l'énergie interne et du produit de la pression par le volume. Elle est souvent utilisée pour calculer l'énergie échangée lors d'un changement d'état ou d'une réaction chimique.¹⁰

EPW : EnergyPlus Weather data file. C'est fichier de données météorologique enregistrées dans un format standard utilisé par EnergyPlus, un logiciel de simulation énergétique.

Fruit : En construction et en architecture, le fruit représente la diminution de l'épaisseur d'un mur au fur et à mesure qu'il s'élève en hauteur, résultant à une inclinaison de la surface extérieur du mur, sa base étant plus épaisse que son sommet.

Inertie thermique : L'inertie thermique traduit la propriété qu'ont les matériaux à stocker et à restituer de l'énergie dans le temps. Elle dépend de leur conductivité, de leur capacité thermique, ainsi que de leur masse volumique. Elle caractérise le temps de réponse du matériau soumis à une modification des températures. Plus le temps mis pour atteindre un nouvel équilibre thermique est long, plus le matériau est inerte. Le chauffage et/ou le refroidissement d'un local à faible inertie thermique seront rapides, tandis que dans le cas d'un local à forte inertie thermique, ils seront plus lents.¹¹

Humidité relative : L'humidité relative, représente le rapport entre la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air et la quantité maximale possible, exprimée en pourcentage. 100 % correspond à un air saturé en vapeur d'eau (risque de nuage, pluie, brouillard, rosée ou givre), 0 % à un air parfaitement sec (cette valeur d'humidité relative n'est jamais atteinte dans la nature, pas même dans les déserts).¹²

Hygrométrie : Partie de la météorologie qui étudie la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.¹³

Hygro-thermie : Ensemble des phénomènes liés aux interactions entre l'hygrométrie et la thermique.

Matériau capillaire : La capillarité d'un matériau traduit sa capacité à stocker de l'eau liquide dans sa structure interne. L'eau peut se faire aspirer dans ses spores ou capillaires. Il s'agit de suction

capillaire. Les matériaux capillaires favorisent la migration de l'eau liquide à l'intérieur de leurs pores. Le bois est très capillaire alors que le béton est très peu capillaire. Le coefficient d'absorption d'eau (A en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$) est un indicateur de la capillarité d'un matériau.¹⁴

Matériaux hydrophiles ou hydrophobes : Les matériaux hydrophiles attirent l'eau, par exemple : le sel. Les matériaux hydrophobes repoussent l'eau, par exemple : les plastiques, l'huile.¹⁵

Matériau hygroscopique : Un matériau hygroscopique est à la fois poreux et hydrophile. Ce matériau a la propriété de fixer et de stocker une certaine quantité d'eau. La teneur en eau des matériaux influence l'ensemble des paramètres hygrothermiques du matériau. En effet, la masse volumique évolue selon la teneur en eau, mais c'est aussi le cas de la capacité thermique, de la conductivité thermique. La présence d'eau augmente la conductivité thermique du matériau qui perd de sa capacité à isoler.¹⁶

Matériaux putrescibles : Dans des conditions d'humidité prolongée ces matériaux se décomposent.¹⁷

Météo : La météo est l'évaluation du temps qu'il fait ou qu'il va faire à très court terme.

Méridional : Qui est au midi, propre aux régions et habitants du Sud d'un pays.

NF DTU : Norme Française – Document Technique Unifié

OEHM : Optimisation Énergétique de l'Habitat Méditerranéen

Paroi perspirante : Une paroi perspirante permet une bonne migration de la vapeur d'eau au travers de tous les éléments qui la constituent tout en restant étanche à l'air et en évitant le phénomène de condensation. Une paroi perspirante présente la particularité d'autoréguler de façon.¹⁸

Perméabilité à la vapeur d'eau π [Kg/msPa] : C'est la capacité d'un matériau à laisser passer la vapeur d'eau. Plus elle est petite, plus le matériau est étanche à la vapeur.¹⁹

Pierre : Bloc ou masse extrait d'un type de roche pouvant alors être manipulé.

Porosité : Les matériaux poreux contiennent des pores ou des cavités de plus ou moins grande taille

⁹ DUCLOS-PRÉVET, Claire, 2024. La modélisation de processus d'exploration numérique en architecture.

¹⁰ www.actu-environnement.com

¹¹ Rénovation Thermique du bâti traditionnel Normand, 2013. Région Basse-Normandie.

¹² meteofrance.com

¹³ www.larousse.fr

¹⁴ Rénovation Thermique du bâti traditionnel Normand, 2013. Région Basse-Normandie.

¹⁵ Ibid.

¹⁶ Ibid.

¹⁷ Ibid.

¹⁸ Ibid.

¹⁹ Ibid.

pouvant accueillir de l'air et donc de la vapeur d'eau. La structure poreuse peut être ou fermée.²⁰

Porosité fermée : Les vides présents dans le matériau ne communiquent pas entre eux et ne permettent donc pas la circulation de l'air et de l'eau : le matériau est alors imperméable. Exemple : verre, polystyrène.²¹

Porosité ouverte : Les vides présents dans le matériau sont reliés entre eux par des canaux plus ou moins fins permettant la circulation des fluides. Les matériaux de ce type sont perméables. Un matériau poreux à structure ouverte a la propriété de laisser plus facilement traverser la vapeur d'eau.²²

Psychrométrie : Détermination de l'état hygrométrique de l'air.

R : Lettre faisant référence à la résistance thermique d'un matériau ou d'une paroi.

Rayonnement thermique : Émission d'un rayonnement électromagnétique par un corps porté à une certaine température.²³ Ce rayonnement thermique se décompose en trois parties, l'émission de l'énergie thermique d'un corps convertie en énergie électromagnétique, la transmission de cette énergie par propagation d'ondes à un autre corps, et la réception (absorption) de cette énergie électromagnétique par le second corps qui la convertie en énergie thermique, l'absorption dépend aussi de l'émissivité.

Règle "5 pour 1" : Cette règle a été établie pour que la vapeur d'eau contenue dans la maison ne soit pas bloquée à l'intérieur d'une paroi. La face extérieure doit être 5 fois plus perméable que la face intérieure pour assurer une bonne diffusion de la vapeur d'eau.²⁴

Résistance thermique, R [m²°k/W] : La résistance thermique R décrit le pouvoir isolant d'une couche de matériau. Elle se caractérise par deux paramètres : l'épaisseur du matériau et sa conductivité thermique. La formule est $R = e/\lambda$. Plus la résistance thermique est élevée, plus la structure (mur, plafond) est isolante. La résistance d'une paroi composée de plusieurs couches dépend de la conductivité de chaque couche et de leurs épaisseurs respectives.²⁵

Roche : Tout matériau, consolidé ou non, constitutif de la Terre, à l'exclusion des sols et des êtres

vivants, formé d'un agrégat de minéraux et présentant une homogénéité de composition.²⁶

Le terme « roche » désigne tout matériau naturel formé d'un assemblage de minéraux. Certaines roches sont cohérentes et plus ou moins dures (à l'exemple, des calcaires ou des granites), tandis que d'autres sont plastiques (argiles notamment) ou encore meubles (sables par exemple). Le terme « pierre » désigne quant à lui tout fragment de roche.²⁷

Septentrional : S'oppose à Méridional. Qui est au Nord, propre aux régions et habitants du Nord d'un pays.

SNROC : Syndicat National des Industries de Roches Ornamentales et de Construction.

STD : Simulation Thermique Dynamique.

Thermique : Partie de la physique et de la technique qui traite de la production, de la transmission et de l'utilisation de la chaleur

Traditionnel : Qui est fondé sur la tradition, sur un long usage.

U : Lettre faisant référence au coefficient de conductivité thermique d'un matériau ou d'une paroi.

Vernaculaire : Propre à un pays, à ses habitants.²⁸

WP : Word Packages

²⁰ Ibid.

²¹ Ibid.

²² Ibid.

²³ www.larousse.fr

²⁴ Rénovation Thermique du bâti traditionnel Normand, 2013. Région Basse-Normandie.

²⁵ Ibid.

²⁶ www.larousse.fr

²⁷ BRGM, 2014. Mémento sur l'industrie française des roches ornementales & de construction.

²⁸ Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) : www.cnrtl.fr

1_ Introduction

Depuis plus d'une cinquantaine d'années, la modernisation des réalisations architecturales, permise par les avancées technologiques comme l'apparition de nouveaux matériaux, l'informatisation de la production graphique et l'évolution des processus constructifs, a considérablement étendu les limites de la construction. Ce développement a cependant favorisé l'optimisation d'objets techniques plutôt qu'une écologie du milieu, modifiant notre rapport aux technologies et à l'habitat. Il en résulte, une rupture progressive entre intérieur et extérieur, ainsi que la création d'un climat artificiel nécessitant une consommation énergétique importante. Dans ce contexte, l'architecture en pierre, guidée par les principes bioclimatiques et l'architecture vernaculaire, peut-elle relever les défis de la réglementation énergétique contemporaine ?

L'architecture en pierre occupe aujourd'hui une certaine place dans les réflexions portant sur les matériaux de construction du 21^e siècle. Bien qu'elle soit souvent considérée comme un matériau durable et éco-responsable, ses performances énergétiques restent encore insuffisamment mises en valeur. Ce mémoire vise ainsi à présenter les éléments jouant un rôle important pour le confort hygrothermique d'une maison construite en pierre naturelle.

Une brève exposition au sujet permettra, dans un premier temps, d'introduire les enjeux actuels, les questionnements abordés dans ce mémoire et les hypothèses qui en découlent. Elle conduira à formuler la problématique ainsi qu'à exposer la méthodologie générale adoptée pour y répondre.

Le premier volet présentera ensuite les connaissances nécessaires à la compréhension du sujet, en abordant dans un premier temps le bioclimatisme et l'architecture vernaculaire, puis le rôle de la paroi et les propriétés de la pierre, et enfin, le processus de conception architecturale en lien avec les simulations énergétiques. Ces domaines, étroitement interdépendants, doivent être appréhendés conjointement afin d'en saisir la cohérence. L'introduction aux principes bioclimatiques conduira à définir la zone climatique étudiée, à analyser son influence sur la forme architecturale et à identifier les réponses élaborées par l'architecture vernaculaire. La compréhension

des échanges hygrothermiques au sein de la paroi permettra ensuite d'aborder les propriétés de la pierre et son fonctionnement. Enfin, le processus de conception architecturale sera présenté en continuité avec l'intégration des simulations énergétiques, conçues comme des outils d'aide à la décision et d'évaluation des performances.

Le deuxième volet sera consacré à la présentation détaillée de la méthodologie et des outils mobilisés pour répondre à la problématique posée. Le domaine d'étude sera précisément délimité et décrit, afin d'en saisir les enjeux propres et les caractéristiques déterminantes. Une première étude descriptive dressera un portrait du climat des zones d'étude retenues, puis examinera les stratégies architecturales vernaculaires qui leur sont associées. Cette analyse préliminaire permettra de situer les expérimentations dans un cadre cohérent en justifiant les choix opérés. Elle constituera ainsi une base solide pour l'élaboration d'un protocole rigoureux, garantissant la pertinence des résultats et leur capacité à éclairer les choix de conception.

Le troisième volet regroupera les études expérimentales, la présentation des résultats obtenus et leur analyse critique. Les expérimentations seront menées à deux échelles complémentaires, l'une centrée sur les transferts hygrothermiques au sein des parois, l'autre sur les performances énergétiques globales à l'échelle du bâtiment. L'analyse des phénomènes hygrothermiques permettra d'éclairer le fonctionnement intrinsèque de la pierre et d'évaluer les avantages et les limites des différentes compositions de parois. L'étude énergétique, conduite au moyen de simulations thermiques dynamiques, examinera quant à elle la capacité de ces configurations à assurer un confort intérieur satisfaisant tout au long de l'année. Les premiers résultats obtenus viendront orienter les choix et les hypothèses des expériences suivantes, afin de garantir la cohérence de l'ensemble et d'aboutir à une compréhension globale du potentiel de la pierre dans la conception architecturale contemporaine.

En conclusion, la synthèse des résultats permettra de résumer les principaux éléments pouvant aider à une conception architecturale adaptée à une maison en pierre naturelle, en accord avec les réglementations environnementales actuelles et les évolutions contemporaines du projet architectural.

2_ Exposition du sujet

2.1_ Exposition Générale

2.2_ Intérêt de Recherche

2.3_ Problématique et Hypothèses

2.4_ Méthode de recherche générale

2.1_ Exposition générale

Les méthodes de conception en architecture varient avec les avancées technologiques de chaque période historique, tant bien d'un point de vue des matériaux de construction que des outils qui permettent de penser l'architecture. Jusqu'à présent, les méthodes de conception ont continuellement évolué en s'adaptant aux innovations techniques, qu'elles proviennent des matériaux de construction ou des outils permettant de concevoir l'architecture.

Vitruve le décrit très bien dans le livre II de son traité de l'architecture²⁹, qui traite de la mise en œuvre des différents matériaux :

« Il n'y sera plus question de l'origine de l'architecture, mais bien de celle des bâtiments ; et je dirai comment on est parvenu à donner à l'art de bâtir les développements et le degré de perfection où nous le voyons aujourd'hui. »

La conception, autrefois centrée sur l'acte de bâtir et sur les procédés constructifs qui en déterminaient la faisabilité, s'est progressivement transformée en une démarche tournée vers la définition de l'espace et l'intention artistique, reléguant au second plan la maîtrise des méthodes de construction. Auparavant, la conception était guidée par la tradition et les lois de proportions définies par le temps et les civilisations passées. Les matériaux sont et resteront un des éléments majeurs composant l'architecture. Les techniques de construction se sont développées au fur et à mesure des siècles afin de se protéger au mieux contre les éléments naturels tels que le climat ou les prédateurs, ainsi que pour produire les espaces adaptés aux cultures locales. Bien que les différentes architectures qui se sont développées aient des racines communes, elles diffèrent complètement d'un endroit à un autre du globe terrestre et ce selon les climats. Nous avons, par exemple, vu émerger des techniques de constructions traditionnelles propres aux conditions locales. Il est tout de même important de souligner, comme le défend Amos Rapoport, « [...] quel que soit le déterminant spécifique de la forme qui ait été souligné, les théories inclinent, d'une

*manière par trop simpliste, à attribuer la forme à une cause unique »*³⁰. La condition climatique n'est en aucun cas l'unique contrainte qui a permis la diversification de l'architecture dans le monde entier. Il introduit notamment l'influence des cultures et religions dans la définition des espaces bâtis.

Néanmoins, le rythme du progrès s'est accéléré de manière spectaculaire, transformant en profondeur l'ensemble des domaines techniques, sociaux et culturels. Cette dynamique trouve un point d'inflexion majeur au lendemain des deux guerres mondiales du XX^e siècle. Comme le décrit Jean-Claude Guillebaud dans *Une autre vie est possible : comment retrouver l'espérance*³¹, cette période inaugure une « mutation » de la société qui touche simultanément plusieurs dimensions, notamment la technique, le numérique, le social, le culturel et le politique.

La modernisation des réalisations architecturales, permise par les avancées technologiques comme les matériaux ou les ordinateurs, a permis d'étendre les limites de la construction. Représentée par le béton armé, les matériaux composites et industriels, les systèmes de ventilation et de chauffage, la modernisation a notamment permis de rendre possible le confort (eau courante, salles de bains, etc.) dans la grande majorité des logements en France. En effet, après « la prise de contrôle des champs pétrolifères par les grandes puissances, nous avons connu une période où l'énergie était abondante et bon marché. [...] On a abandonné les savoir-faire ancestraux pour la préfabrication et le béton armé. » affirme Gilles Perraudin.³²

De plus, le développement de toutes ces technologies a conduit à une optimisation des objets techniques plutôt qu'à une écologie du milieu qui viserait à optimiser les habitudes de vie et de relation aux technologies³³. Une vision déjà établie par Rapoport avant les années 2000 : « *Le pauvre fonctionnement thermique de nombre de nos bâtiments, en dépit de tous ces équipements mécaniques, nous conduit à penser que nous ne pouvons ignorer l'environnement physique et que nous sous-estimons son action continue sur nos villes et nos bâtiments* »³⁴.

²⁹ VITRUVÉ, 1847. De l'Architecture. Tome I. Livre II. Traduction nouvelle par M. Ch.-L. Maufras, etc.

³⁰ AMOS RAPOPORT, 1996. Pour Une Anthropologie De La Maison. p.26

³¹ GUILLEBAUD, Jean-Claude, 2014. Une autre vie est possible Comment retrouver l'espérance.

³² Interview de Gilles Perraudin par Valéry Didelon dans : NUSSAUME, Yann, 2012. Gilles Perraudin. Dijon : Les presses du réel. Collection architecture. ISBN 978-2-84066-416-1. p.120.

³³ PETIT, Victor, 2024. Milieu Tech. Beyond High Tech Low Tech. Conférence. EPFL. 2024.

³⁴ AMOS RAPOPORT, 1996. Pour Une Anthropologie De La Maison. p.117

Simultanément, le développement du numérique a ouvert la voie à la constitution de bases de données volumineuses et exploitables. Il devient ainsi plus facile de concevoir des architectures adaptées aux conditions climatiques locales, permettant d'optimiser le confort tout en réduisant au minimum les besoins énergétiques supplémentaires. De plus, l'impact environnemental des matériaux pose de plus en plus question, il est alors bon dans la logique d'écologie du milieu de maximiser l'utilisation des ressources locales. L'utilisation de ces matériaux, de dispositifs constructifs, ainsi que de solutions passives est alors moins présente dans l'architecture contemporaine (même si l'intérêt et le nombre de réalisations s'accroissent).

L'architecture traditionnelle peut servir de référence pour les réalisations futures. Combinée aux informations contemporaines sur le climat, les matériaux et le confort humain, elle permet d'établir un cadre suffisant pour des analyses précises. L'étude du vernaculaire, bien documentée³⁵, révèle des principes de conception encore exploitables aujourd'hui, alliant approche bioclimatique et logique constructive, et offre une vision de l'architecture adaptée au milieu local. Les outils numériques modernes permettent de mieux comprendre ces relations entre climat, matériaux et conception, et de valoriser des ressources comme la pierre, tout en favorisant une architecture efficace, contextualisée et respectueuse des savoir-faire traditionnels.

Ces analyses pourront donc être réalisées à l'aide des outils de conception numérique moderne afin d'étudier les impacts de la forme, des matériaux et d'autres éléments sur les performances énergétiques.



Figure 1: Immeuble quai de la mairie à Marseille par Fernand Pouillon (Source : <http://archi.climatic.free.fr/0822.html>)

³⁵ GWYN, I. Merion- Jones, 1979. La maison traditionnelle. Bibliographie de l'architecture vernaculaire en France. Persée - Portail des revues scientifiques en SHS.

Peut-on alors mobiliser les technologies contemporaines pour améliorer les méthodes de conception architecturale au profit des matériaux naturels ?

2.2_ Intérêt de recherche

La pierre, matériau historique, incite à penser durabilité, inertie thermique, résistance, et bien d'autres qualités. Ce matériau évoque dans l'esprit de nombreux observateurs de multiples vertus, tant techniques qu'esthétiques. Pourtant, elle n'est plus autant employée dans l'architecture contemporaine qu'autrefois. Lors de la période de reconstruction d'après-guerre, la quasi-totalité de la France se tourne vers le béton armé pour sa rapidité de mise en œuvre et son coût réduit. Fernand Pouillon représente à l'inverse la volonté de certains architectes de continuer à utiliser la pierre, et ce, dans un contexte où elle tendait à disparaître. Architecte engagé dans la reconstruction du sud de la France, il a su instaurer la pierre comme matériau de construction, tout en gardant comme priorité la qualité de l'habitat, y compris pour les populations les plus modestes. Il a ainsi réalisé des projets emblématiques tels que la rénovation du Vieux-Port de Marseille (Figure 1) et la construction de logements sociaux en banlieue parisienne, démontrant qu'il était possible d'allier modernité, exigence sociale et utilisation d'un matériau traditionnel.

Depuis, certains architectes continuent de valoriser la pierre à petite échelle, tandis que d'autres, comme Gilles Perraudin, en ont fait leur matériau de prédilection. Cependant, ces praticiens restent peu nombreux. La construction en pierre exige un savoir-faire spécifique, notamment pour le dessin des arcs ou des linteaux afin de compenser la faible résistance à la traction, ainsi que pour la réalisation précise du calepinage. Par ailleurs, la performance thermique des façades en pierre massive fait encore l'objet de débats, ce qui contribue à limiter son usage dans les projets contemporains. Et pourtant, comme le dit Perraudin, « *Pouillon n'ajoutait pas d'isolant sur ses murs en pierre, ce qui serait impossible avec les normes constructives actuelle* »³⁶.

Néanmoins, bien que ses qualités soient connues et tout autant discutées, peu de recherches permettent réellement de démontrer l'efficacité

³⁶ Interview de Gilles Perraudin réalisée par PICOUT Laurie, dans la partie, Utiliser la pierre est une solution morale et éthique (pp. 42-49) dans : BORNE, Emmanuelle et FONTÈS, François, 2017. Construire en pierre. L'Architecture d'Aujourd'hui. mars 2017. Vol. n°417.

thermique de la pierre, que ce soit par des analyses faites sur le terrain ou encore par des maquettes numériques. Plusieurs témoignages en font d'ailleurs échos, notamment celui de Michel Goutal (Architecte) :

« Les calculs d'efficacité des bâtiments sont faits pour d'autres matériaux, nous sommes en train de les adapter pour vérifier que la pierre peut aussi être performante, il suffira ensuite d'adapter sa mise en œuvre. On trouvera, c'est sûr. »,

« Il faut faire de la recherche, approcher ce matériau comme une nouvelle technologie, un potentiel inexploré traité avec des outils nouveaux et des mises en pratique et c'est déjà le cas »³⁷.

Les recherches sur la pierre en France semblent être réalisées au sein des agences et des entreprises pour leurs utilisations dans la réalisation de leurs projets mais peu d'entre-elles ont été publiées dans la sphère scientifique. Cette phrase de Michel Goutal exprimant l'idée d'étudier la pierre comme une nouvelle technologie interpelle le besoin actuel d'expérimentations numériques sur l'efficacité énergétique des constructions en pierre. En effet, ce matériau possède des qualités intrinsèques intéressantes mais est un matériau formé naturellement et présente donc une certaine complexité. Gilles Perraudin va jusqu'à dire que « la pierre fonde une autre démarche architecturale, celle de l'intelligence constructive, et la soumission à l'exigence de la matière, c'est la libération »³⁸.

De prime abord, l'efficacité des bâtiments en pierre semble évidente, notamment dans les régions méridionales de France où le climat est plus chaud, car l'inertie thermique de la pierre permet de stabiliser la température intérieure malgré les fluctuations extérieures. Cependant, la pierre a également été largement utilisée dans les régions septentrionales, comme en témoigne la forte présence de bâtiments traditionnels ayant traversé plusieurs siècles, bien que les standards de confort et les préoccupations énergétiques diffèrent de ceux d'aujourd'hui. Comme le souligne Gilles Perraudin, « Beaucoup de gens pensent que l'architecture en pierre est un avatar du Sud, mais en Europe du Nord on a aussi toujours beaucoup construit en pierre. Le problème auquel il a cependant fallu faire face de tout temps, c'est celui de

l'inconfort ressenti en hiver. La pierre absorbe le rayonnement infrarouge émis par le corps. [...] Mais comme je l'ai déjà dit, au Nord comme au Sud, le vrai problème est moins de se réchauffer en hiver que de se rafraîchir en été. Et de ce point de vue, c'est l'inertie des bâtiments qui est déterminante dans les zones qui connaissent de grandes amplitudes thermiques. [...] Les constructions massives sont évidemment les mieux adaptées, l'architecture en pierre prouve ici toute sa pertinence. Le vrai clivage n'est pas entre le Nord et le Sud, mais entre les zones continentales et côtières. Sur les littoraux, au bord des mers ou des lacs, qu'ils soient au Nord ou au Sud, l'inertie est procurée par la masse d'eau qui atténue les écarts de température entre l'hiver et l'été. Le seul problème est alors la présence d'humidité qu'il faut combattre par la ventilation »³⁹.

On entend aujourd'hui énormément parler de rénovation de ces constructions par ajout d'isolation à l'intérieur ou à l'extérieur du bâti. Ces constructions sont-elles vraiment obsolètes ? Ont-elles quelque chose à nous apprendre ? Produisent-elles un espace intérieur si éloigné de la zone de confort de l'être humain ? Cette architecture traditionnelle est en plus énormément documentée grâce à de nombreuses études, recherches et associations locales. Il existe notamment une bibliographie qui classe un ensemble d'ouvrages sur l'architecture traditionnelle française⁴⁰.

Les données manquantes concernent l'efficacité thermique des matériaux ainsi que l'efficacité énergétique mesurée sur une année entière pour une maison occupée. Les outils contemporains, tels que les logiciels de simulation énergétique, de modélisation architecturale ou de simulation des transferts thermiques, permettent de réaliser des études capables d'apporter des éléments de réponse à ces questions. Certains de ces outils peuvent mesurer les conditions réelles dans un édifice construit, tandis que d'autres permettent d'évaluer des modèles 3D non construits, intégrés dès le processus de conception.

Néanmoins, une évolution des méthodes de conception architecturale, amorcée vers la fin du XX^e siècle, s'inspire de l'architecture traditionnelle fondée sur l'utilisation de matériaux naturels. L'architecture bioclimatique, qui consiste à

³⁷ Interview de Michel Goutal réalisée par SABBAH Catherine dans la partie, L'âge de pierre, vers une renaissance (pp.50-55) dans : BORNE, Emmanuelle et FONTÈS, François, 2017. Construire en pierre. L'Architecture d'aujourd'hui. mars 2017. Vol. n°417.

³⁸ Emmanuelle Borne retranscrit les paroles de Gilles Perraudin dans la partie La perspective de la pierre (pp. 40-41) dans : BORNE, Emmanuelle et FONTÈS, François, 2017. Construire en pierre. L'Architecture d'aujourd'hui. mars 2017. Vol. n°417.

³⁹ NUSSAUME, Yann, PERRAUDIN, Gilles et DIDELON, Valéry, 2012. Gilles Perraudin. Dijon : Les presses du réel. Collection architecture. pp.121.

⁴⁰ GWYN, I. Merion- Jones, 1979. La maison traditionnelle. Bibliographie de l'architecture vernaculaire en France. Persée - Portail des revues scientifiques en SHS.

concevoir les bâtiments en fonction des caractéristiques du climat local afin d'optimiser le confort thermique et la performance énergétique, s'inscrit dans cette continuité. Cette approche pourrait-elle fournir des méthodes ou des solutions adaptées à l'architecture en pierre, en conciliant savoir-faire traditionnel et outils numériques contemporains ?

2.3_ Problématique et hypothèses

Il existe donc énormément d'angles d'approche pour étudier l'efficacité thermique de la pierre. Étant étudiant en master d'architecture, il est évident que mon approche se fera en lien avec mes études et mon intérêt personnel. L'architecture est étroitement liée à beaucoup de sujets, mais un seul lui est propre, le processus de conception. En effet, la conception est commune à l'ensemble des arts créatifs, néanmoins, cette dernière, en architecture est unique. La conception architecturale est propre à chaque architecte, par exemple, mon angle d'approche se fait par la matière. A l'image de Régis Roudil qui intègre 4 points (masse, matière, lumière, proportions) dans sa méthode de conception intégrant la matière, jusqu'à dire que *« chacun de ses projets commence par le choix du matériau, car c'est lui, insiste-il, qui fabrique l'architecture »*⁴¹.

De cette manière, le matériau choisi oriente le processus de conception architecturale, s'adaptant à ses propriétés. Les méthodes constructives, les performances thermiques et les caractéristiques techniques propres au matériau interviennent alors directement dans le processus de conception, guidant les choix et permettant de tirer pleinement parti de ses avantages selon la situation, qu'il s'agisse du climat, des ressources disponibles ou d'autres contraintes contextuelles.

La conception d'une maison en pierre aura pour but de tirer parti de ses caractéristiques pour atteindre l'objectif demandé. Il sera donc question de traiter la paroi qui sépare l'environnement intérieur de l'environnement extérieur et donc de l'efficacité thermique afin de satisfaire le confort des habitants.

Nous pouvons alors nous demander comment assurer le confort thermique lors de la conception

d'une maison en pierre grâce aux outils contemporains ?

Même si le confort thermique paraît être un objectif simple, il est bien plus complexe à traiter lorsqu'il ne requiert que l'utilisation de matériaux naturels comme la pierre qui ne sont pas fabriqués industriellement dans un but précis, d'autant plus que la température n'est pas le seul facteur à prendre en compte puisque le confort thermique dépend de nombreux paramètres interconnectés qui rendent son appréhension difficile. Cette complexité appelle alors une réflexion sur les outils et méthodes à mobiliser dès les premières phases de conception, en particulier dans un contexte de recherche architecturale où la matière devient le point de départ du projet. Il s'agit donc d'interroger les capacités réelles de la pierre à répondre aux exigences contemporaines de confort sans recourir à des systèmes complémentaires, en s'appuyant sur une approche bioclimatique qui permettrait de tirer parti des qualités intrinsèques du matériau.

Suite à ces différents constats, la problématique de recherche pour ce mémoire est la suivante :

Comment optimiser le confort hygrothermique lors de la conception d'une maison en pierre naturelle dans un climat tempéré à l'aide de méthodes de conception bioclimatique et de simulations énergétiques ?

Dans le cadre de cette recherche, il s'agit d'évaluer la pertinence de la pierre comme matériau capable d'assurer un bon confort thermique dans les bâtiments, en s'appuyant sur des principes de conception passive. Ce travail s'inscrit dans une logique d'optimisation à différentes échelles : celle du site, de la forme bâtie et de la paroi. Ainsi, pour répondre à la problématique, l'hypothèse principale est la suivante :

Le confort thermique d'un bâtiment en pierre dans un climat tempéré peut être significativement amélioré par une conception bioclimatique à plusieurs échelles (site, bâtiment, paroi), sans recours à des systèmes actifs en intégrant les simulations énergétiques dans le processus de conception architectural.

Nous émettons alors les sous-hypothèses suivantes en fonction des différentes échelles de résolution.

⁴¹ Interview de Régis Roudil réalisée par LECLERC David dans : BERTHIER, Stéphane, 2022. Le renouveau de l'architecture en pierre. d'architectures. février 2022. Vol. n°296.

A l'échelle du site :

- Dans les régions froides et tempérées comme le nord de la France, l'orientation principale du bâtiment et de ses ouvertures vers le sud permet d'optimiser les gains solaires passifs et d'améliorer le confort thermique d'un bâtiment en pierre.
- Dans les régions chaudes comme le sud de la France en été, une orientation principale au nord permet de limiter les surchauffes d'été et d'assurer un meilleur confort intérieur dans un bâtiment en pierre.
- La protection contre les vents dominants (par l'implantation ou la forme du bâtiment) réduit les pertes thermiques et renforce l'efficacité thermique d'un bâtiment en pierre.

A l'échelle du bâtiment :

- Une forme bâtie compacte, adaptée au climat local, limite les surfaces d'échange thermique et améliore la performance énergétique globale d'un bâtiment en pierre.
- La gestion des ouvertures (position, orientation, proportion) est un levier essentiel pour maximiser les apports solaires en hiver et limiter les déperditions thermiques, particulièrement dans une enveloppe massive en pierre.
- L'adaptation de l'inclinaison ou de l'orientation des murs à l'angle solaire saisonnier, de manière analogue aux panneaux solaires, permettrait d'améliorer les apports thermiques passifs.

A l'échelle de la paroi :

- L'augmentation de l'épaisseur des murs en pierre améliore l'inertie thermique et le déphasage, favorisant ainsi une meilleure régulation des températures intérieures.
- L'ajout d'une isolation extérieure tout en laissant la pierre apparente à l'intérieur permet de profiter à la fois de l'inertie thermique du matériau et d'une meilleure isolation, en réduisant la sensation de paroi froide en hiver.
- La mise en œuvre d'un double mur en pierre, séparé par une lame d'air, agirait comme isolant naturel et permettrait de casser la transmission directe de chaleur à travers la paroi.

L'ensemble de ces hypothèses d'approche de la problématique nous questionne donc sur la méthode à employer pour y répondre correctement.

2.4_ Méthode de recherche générale

Afin de répondre à l'hypothèse principale, selon laquelle le confort thermique d'un bâtiment en pierre dans un climat tempéré peut être significativement amélioré par une conception bioclimatique à plusieurs échelles (site, bâtiment, paroi), sans recours à des systèmes actifs, la méthode de recherche adoptée repose sur une articulation en trois niveaux interdépendants et complémentaires, en lien direct avec les sous-hypothèses formulées.

L'objectif de cette démarche est d'évaluer la pertinence des différentes stratégies de conception passives, à travers une combinaison de recherches théoriques, d'analyses de cas et d'expérimentations numériques, afin de se rapprocher le plus possible d'une réponse viable à la problématique formulée.

Dans un premier temps, un travail d'analyse visera à identifier :

- Les principes de conception passive adaptés aux climats tempérés en France,
- Les logiques constructives de l'architecture vernaculaire en pierre, étudiées à travers des cas d'habitat traditionnel Français

Cette étape permettra de formuler des hypothèses constructives et spatiales fondées sur un savoir

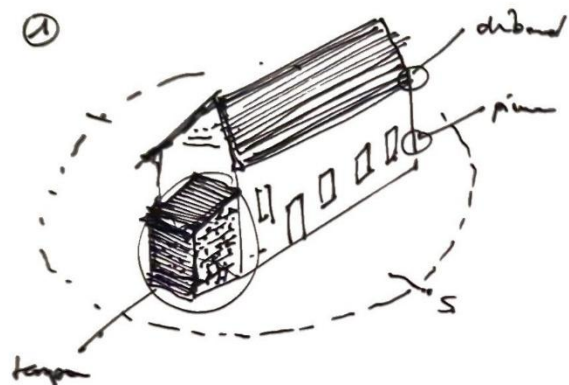


Figure 2 : Analyse du vernaculaire à l'aide de méthodes (Source : Auteur)

empirique, et de relier ces configurations aux spécificités climatiques de leur contexte d'origine.

Dans un second temps, des expérimentations numériques seront menées pour comprendre les transferts hygrothermiques au sein de différentes configurations de parois en pierre, en jouant sur des variables telles que :

- L'épaisseur du mur en pierre
- La présence ou non d'isolants
- La position de l'isolation (intérieure, extérieure)
- L'usage de lames d'air ou de doubles murs
- L'orientation et l'inclinaison de la paroi
- Le type de pierre employé

L'objectif est ici de quantifier l'effet de chaque paramètre sur les transferts hygrothermiques, notamment en termes de déphasage, d'inertie et de confort perçu selon la condition extérieure.

La dernière étape consiste à exploiter les résultats issus des deux premières pour les intégrer dans une modélisation énergétique globale à

l'échelle du bâtiment. Grâce à une méthode d'optimisation paramétrique appliquée à la conception architecturale, des scénarios-types seront testés en combinant :

- Différentes configurations de parois,
- Des dispositifs bioclimatiques à l'échelle de la forme bâtie et du site

L'objectif est double :

- Évaluer l'impact combiné de ces solutions sur la performance énergétique d'une maison en pierre en France,
- Identifier les leviers les plus influents sur la consommation énergétique réelle, afin d'éclairer les choix de conception.

Cette démarche permet également d'ajuster les paramètres de projet (forme, orientation, matériaux, ouvertures) et d'en observer les effets sur le confort thermique, ouvrant la voie à des stratégies de conception informées et performantes.

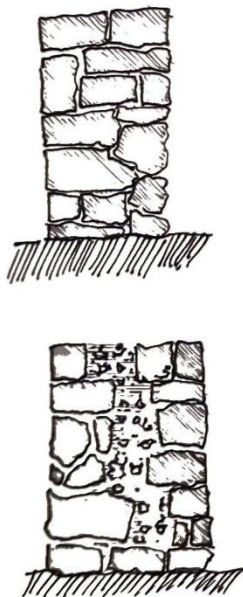


Figure 3 : Comprendre les différents impacts des paramètres d'une paroi en pierre (Source : Auteur)

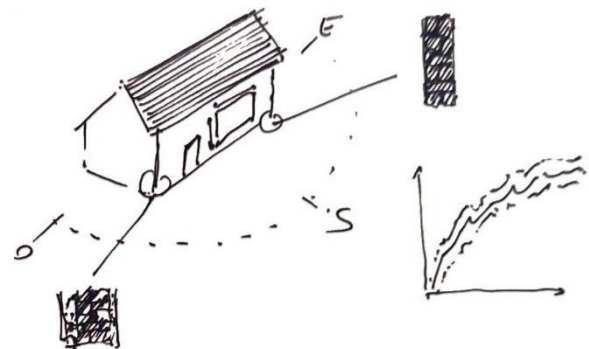


Figure 4 : Lier les deux premières étapes dans une analyse paramétrique et optimisée (Source : Auteur)

3_ État de l'art des connaissances

3.1_ Les prémices de la forme et des solutions passives : l'architecture vernaculaire en réponse au climat tempéré en France

- 3.1.1_ L'architecture bioclimatique
- 3.1.2_ L'architecture vernaculaire
- 3.1.3_ Un zoom sur la France

3.2_ Les transferts hygrothermiques dans une paroi en pierre naturelle

- 3.2.1_ La pierre naturelle en France
- 3.2.2_ La paroi, écran protecteur du monde extérieur
- 3.2.3_ La Pierre : un matériau naturel et complexe
- 3.2.4_ Analyse hygrothermique des matériaux naturels

3.3_ Conception architecturale et simulation énergétique

- 3.3.1_ Simulation énergétique
- 3.3.2_ Importance du processus de conception
- 3.3.3_ Analyse énergétique et conception architecturale

Les connaissances sur le sujet de l'efficacité énergétique des bâtiments en pierre englobent de nombreux domaines et dépendent énormément des différents contextes possibles.

Cette partie permettra de présenter en trois sections majeures les connaissances sur ce sujet.

Dans un premier temps (partie 3.1) seront présentés les notions du lien entre la condition climatique et la réponse de l'architecture vernaculaire.

Dans un second temps (partie 3.2), l'accent sera mis sur les propriétés de la pierre, les avancées récentes de la recherche sur ce matériau ainsi que le fonctionnement hygrothermique d'une paroi.

Pour finir, l'importance du processus de conception sur l'impact de la réalisation finale, et ce, lié aux analyses énergétiques par simulations numérique (partie 3.3).

Cette organisation suit les trois étapes présentées dans la méthode de recherche générale.

3.1_ Les prémices de la forme et des solutions passives : l'architecture vernaculaire en réponse au climat tempéré en France

3.1.1_ L'architecture bioclimatique

3.1.1.1_ L'environnement climatique et son interaction avec l'être humain

Le climat représente l'intégration dans le temps d'une condition caractéristique météorologique pour une localisation géographique précise. Il désigne l'ensemble des facteurs météorologiques étudiés sur une longue période permettant d'émettre des données moyennes. Il est alors primordial de faire la différence avec la météo qui représente une condition météorologique à un instant précis.

Climat : Ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné.

Météo : Informations données sur l'état du temps, de l'atmosphère.⁴²

« Alors que le concept de météo couvre la situation atmosphérique immédiate en un lieu donné de la Terre, le concept de climat indique la météo moyenne sur un certain nombre d'années, généralement au moins 30 ans. Ainsi, les changements climatiques sont enregistrés lentement. »⁴³

Le climat fait partie d'une des conditions données et inchangeable lors de la conception d'un projet d'architecture au même titre que le site. Il convient alors d'étudier et de comprendre la condition climatique dans sa globalité avant de l'étudier à plus petite échelle.

La classification des différents climats a été faite par différents scientifiques selon de nombreux facteurs qui influencent les conditions climatiques. Celle qui a le plus capté mon attention et qui est souvent utilisée dans le domaine de l'architecture

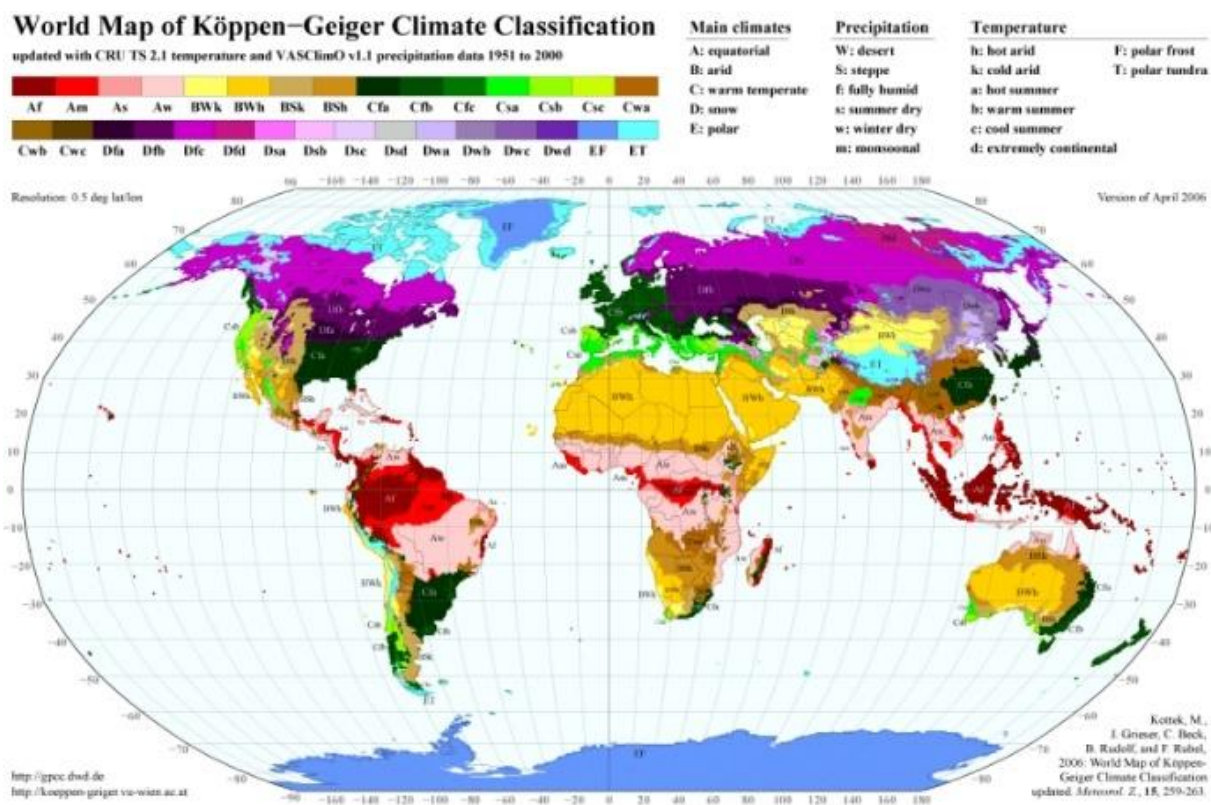


Figure 5 : Carte de classification des climats selon la méthode Köppen-Geiger (source : site officiel de la classification ; <https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>)

⁴² LAROUSSE. Climat & Météo. Dans : Dictionnaire en ligne Larousse.

⁴³ Traduction de: « Whereas the concept of weather covers the immediate atmospheric situation in a given place on Earth, the

concept of climate indicates the average weather over number of years, usually at least 30 year. Thus, climate changes are registered slowly ». DAHL, Torben, et al., 2010. Climate and architecture. London, New York : Routledge.

est celle réalisée par Köppen-Geiger. Cette classification se base sur les températures et précipitations observées sur la période 1951-2000⁴⁴ (Figure 5).

Cette classification se base sur une succession de trois lettres à la suite et chacune d'entre-elle représente une situation précise. La première représente le type de climat qui se divise alors en cinq cas possible (Tropical (A), Aride (B), Tempéré (C), Continental (D) et Polaire (E)). La deuxième fait référence au régime pluviométrique présent sur le territoire et intègre alors l'humidité et les précipitations et notamment la différence entre les saisons. La dernière correspond aux variations de température selon les saisons.

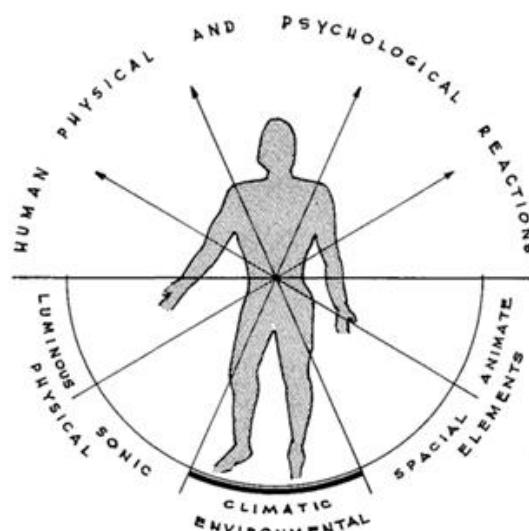
Cette classification permet alors de comprendre les variations de température et d'humidité qui sont présentes dans l'environnement qui nous entoure. De plus, elle permet de visualiser clairement les différences de climats spatialement ainsi que les changements de condition. Ces conditions nécessitent alors des solutions différentes permettant d'offrir à l'utilisateur de l'espace produit un confort. Pour cela, nous devons présenter ce qui définit le confort de l'être humain. La zone de confort dépend de différents facteurs interdépendants comme la température, l'humidité, la vitesse du vent ou encore la pression. Néanmoins, les deux paramètres les plus importants sont la température de l'air ambiant et le taux d'humidité présent dans l'air. De nombreuses études ont démontrés que l'être humain peut se sentir confortable dans un grand intervalle de température ou encore d'humidité. Mais sur une période prolongée, l'être humain a besoin de se trouver dans un espace aux conditions stables. Cette zone de confort a alors été présentée sous un nombre vairé de variable. Torben Dahl présente alors :

« [...] les conditions climatiques dans lesquelles l'homme est le plus à l'aise, tant au travail qu'au repos. Une fourchette de température de $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ est considérée comme un niveau de confort opérationnel dans l'air ambiant. Le corps humain à un degré de tolérance relativement élevé à l'humidité relative de l'air, et il peut rester dans une humidité relative de 20 à 80 % sans ressentir de gêne notable. »⁴⁵

Il énonce aussi la nécessité du changement du volume d'air complet de la pièce 2 fois par heure et

⁴⁴ RUBEL, Franz et KOTTEK, Markus, 2010. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. Meteorologische Zeitschrift. 1 avril 2010. Vol. 19, pp. 135-141. p.1.

⁴⁵ Traduit de : « [...] the climatic conditions under which man is most comfortable, both at work and while resting. A temperature



34. Man as the central measure in architecture.

Figure 6 : L'homme comme mesure centrale en architecture (source : OLYGAY, 2015, p.14)

que l'intégration du mouvement de l'air dépend de nombreux facteurs comme les habits et la nutrition.

Ces intervalles de température et de pourcentage d'humidité sont pour autant des ordres d'idées sur les conditions optimales permettant à l'homme de ne pas dépenser d'énergie pour compenser. Néanmoins, il est important de rappeler que l'être humain est une espèce qui sait s'adapter à son climat et il est alors possible pour lui de légèrement étendre ces intervalles. On parlera alors parfois de zone de confort adaptative dans certains types de climats où l'homme se voit par exemple supporter sans besoin de ventilation une température allant jusqu'à 26°C .

Cette approche climatique de l'architecture place donc l'homme au centre de la réflexion (Figure 6).

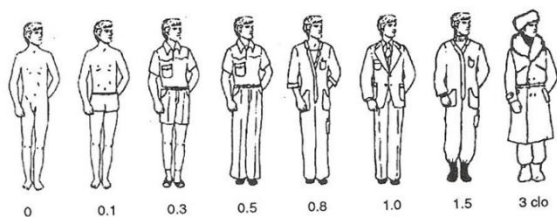


Figure 7 : Facteur d'habillement (source : Climate and Built Form, cours dirigé par Luca Finocchiaro à la NTNU)

range of $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ is considered an operational comfort level in the ambient air. The human body has relatively high degree of tolerance to the air's relative humidity, and it can stay in 20-80% relative humidity without any noticeable discomfort. » dans : DAHL, Torben, et al., 2010. Climate and architecture. London, New York: Routledge. p.26.

« Ce simple écran climatique divise le monde en un extérieur, où l'on est sans protection et exposé aux changements climatiques, et un intérieur, où l'on est protégé et capable d'ajuster les circonstances qui assurent le confort de l'homme. »⁴⁶

La zone de confort est donc impactée par un grand nombre de variables extérieures qui sont les paramètres environnementaux. Un autre paramètre moins important mais accessible et modifiable à l'échelle de l'utilisateur est le vêtement. En effet, porter des couches supplémentaires de vêtements ou en retirer permet d'étendre sa zone de confort. Ce paramètre ne sera pas tant développé dans ce mémoire mais il est important de considérer l'importance de ce dernier qui peut par ailleurs être pris en compte lors des simulations et être donc adapté en fonction de la période de l'année. Ce dernier se classe de sur une échelle de 0 à 3 (Figure 7).

La zone de confort représente donc la présence d'un ensemble de variables dans un certain intervalle.

Toutes ces données sont plutôt difficiles à combiner et c'est pourquoi, la visualisation de ces paramètres est très importante afin de pouvoir les comprendre correctement pour ensuite les étudier

Le graphique psychrométrique (Figure 8) aussi appelé diagramme hygrométrique ou encore graphique bioclimatique présente en un seul document le taux d'humidité présent dans l'air et sa relation avec la température ambiante de l'air (avec une intégration de l'enthalpie). Ce graphique permet alors de comprendre le lien entre humidité dans l'air et température, permettant de visualiser la création du point de rosée lorsque le taux d'humidité dans l'air est saturé, ce dernier peut varier selon la température de l'air. Cette visualisation permet de rapidement résumer la situation climatique d'un lieu. De plus, en représentant la zone de confort définie précédemment dans le schéma, ce dernier permet de visualiser comment se situe les données climatiques de la zone choisie par rapport à la zone

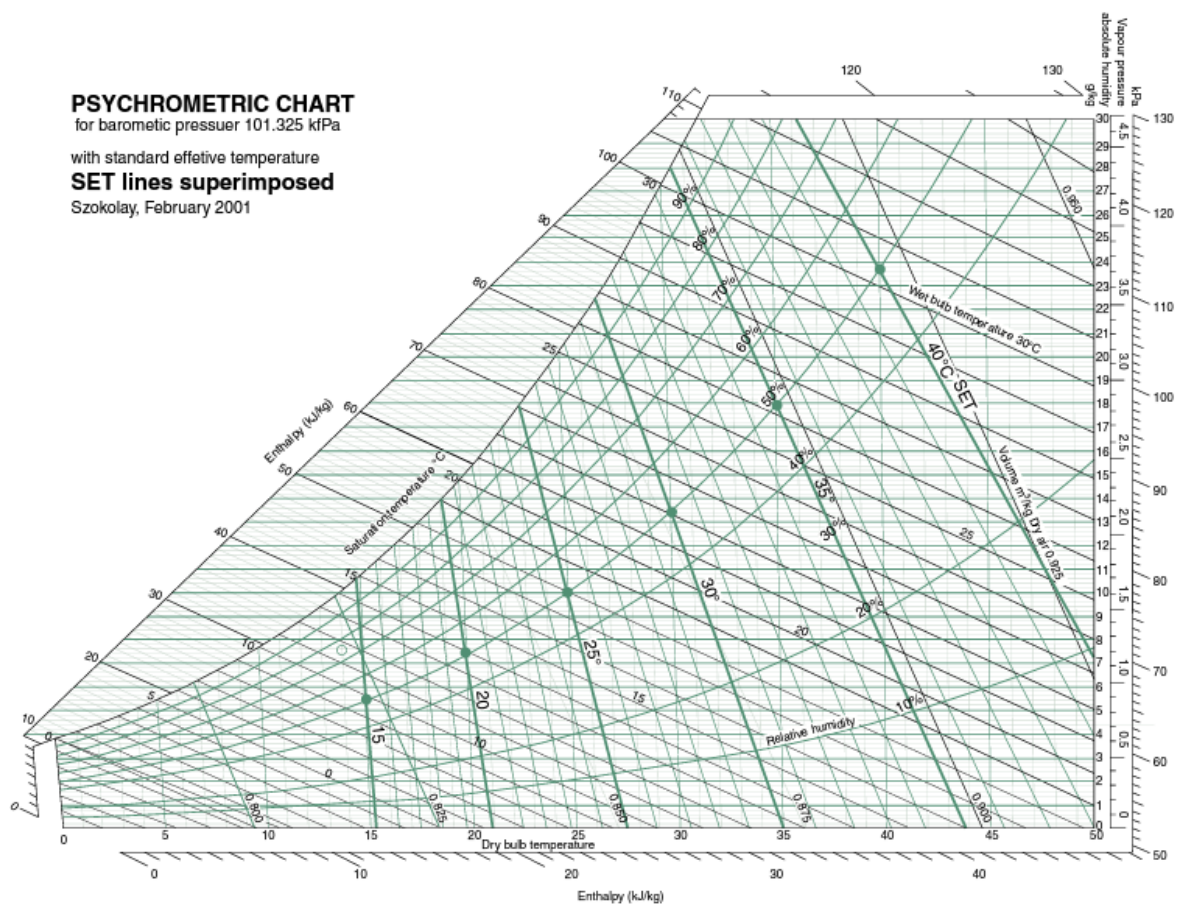


Figure 8 : Graphique psychrométrique de Szokolay (source : SZOKOLAY, 2008, p.13)

⁴⁶ Traduit de : « This simple climate screen divides the world into an outside, where you are unprotected and exposed to climatic changes, and an inside, where you are protected and able to adjust the circumstances that provide human comfort. » dans: DAHL,

Torben, et al., 2010. Climate and architecture. London, New York: Routledge. p.6.

de confort de l'être humain. Cette comparaison met en avant les enjeux du site.

LECHNER prend en compte cette zone de confort et la représente dans le graphique psychrométrique (Figure 9). Il ajoute les différentes grandes zones climatiques en les plaçant dans le graphique afin de visualiser rapidement leurs placements par rapport à la zone de confort de l'être humain.

La zone de confort reste une définition généralisée qui se doit d'être adaptée aux conditions locales. Certaines recherches présentent par ailleurs la zone de zone de confort adaptative en la prédéfinissant selon la moyenne de la température et humidité extérieure. De plus, DAHL évoque, « les avantages que l'influence individuelle sur les paramètres climatiques intérieurs, tels que la possibilité d'augmenter ou de diminuer le chauffage, de contrôler l'ensoleillement et d'ouvrir une fenêtre

pour laisser entrer l'air frais, a sur notre sentiment de bien-être. Cela suggère que la réactivité et le contrôle personnel sont plus importants que tout niveau objectif mesurable de confort »⁴⁷. Cette notion de confort ne dépend alors pas uniquement de la zone de confort définie, mais de aussi de la capacité à l'adapter sur le moment selon un ressenti personnel.

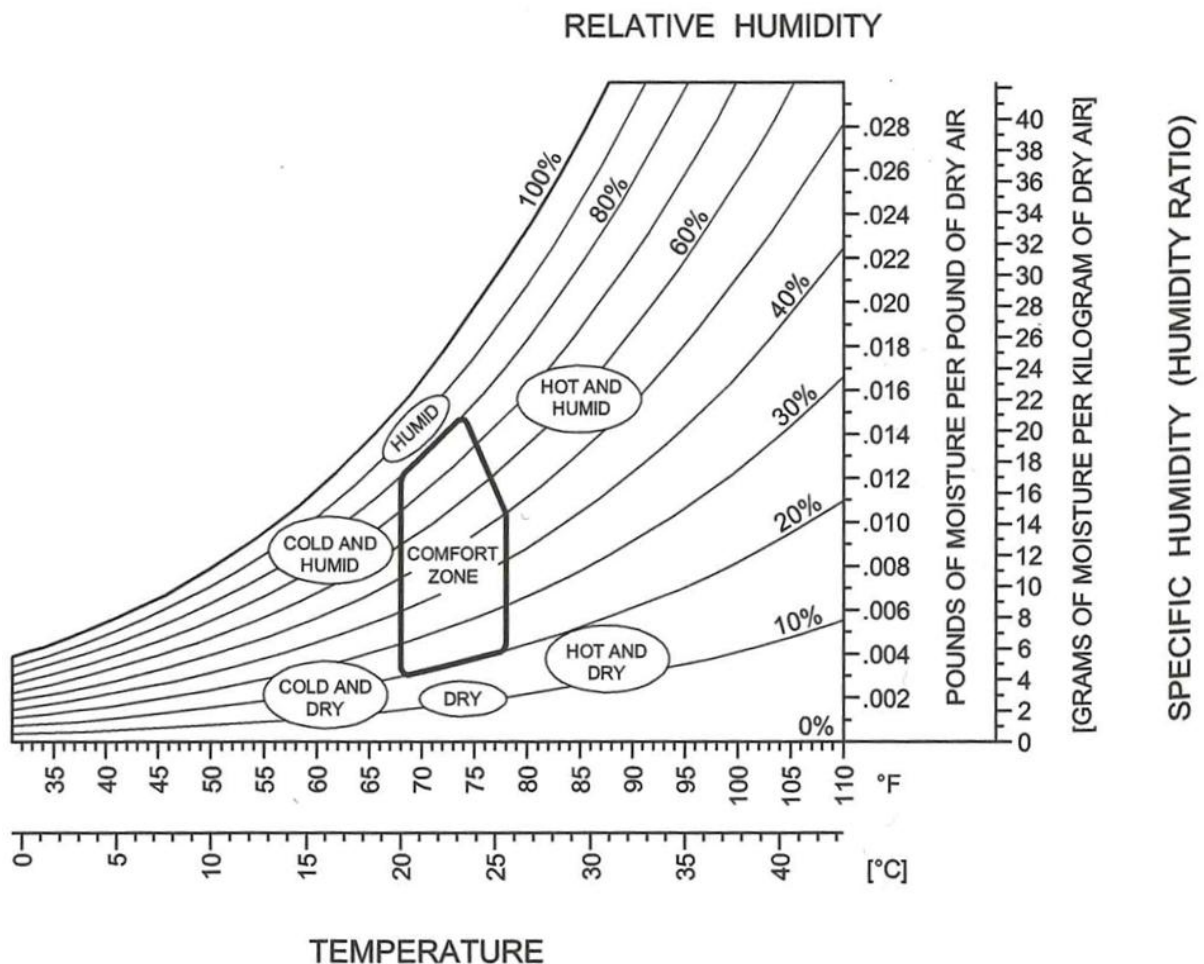


Figure 9 : Zone de confort dans le graphique psychrométrique en lien avec les différents types de climats (Source : LECHNER, 2014)

⁴⁷ Traduit de : « Research has begun to emerge that documents the benefits that individual influence on the indoor climate parameters, such as being able to turn the heating up and down, control the incident sunlight and open a window to let in fresh air, have on our sens of well-being. This suggests that responsiveness

and personal control is more important than any objective measurable levels of comfort. » dans: DAHL, Torben, et al., 2010. Climate and architecture. London, New York: Routledge. p.6.

3.1.1.2_ Les fondements de l'architecture bioclimatique

L'architecture bioclimatique (cf. glossaire) vise à concevoir les bâtiments en tenant compte des conditions climatiques locales afin d'optimiser le confort et la performance énergétique.

Dans son ouvrage : « Heating, Cooling and Lighting », LECHNER propose sa vision par le biais de sa vision des trois tiers de la conception durable appliqués au chauffage, refroidissement et à la lumière (trois éléments du titre). La Figure 11 image donc ces trois tiers.

- 1) Conception basique
- 2) Systèmes passifs
- 3) Équipements mécaniques

Le premier tier consiste à éviter le besoin (de chauffage par exemple) par le design primaire du bâtiment. Les éléments impactant vont donc de la forme et l'orientation jusqu'aux matériaux et surfaces vitrées (positionnement, taille, etc).

Le second tier comprend l'utilisation des énergies naturelles afin de chauffer, refroidir ou éclairer. On parle alors du soleil, du vent et de la pluie qui sont utilisés par les systèmes dits passifs (n'utilisant pas d'énergie supplémentaire). Ces systèmes sont divers et représentent l'application architecturale d'un principe. Comme par exemple, positionner les surfaces vitrées sur la façade la plus exposée au

soleil pour appliquer le principe de chauffage solaire passif.

Le troisième tier représente donc les équipements mécaniques inventés par l'homme qui utilisent de l'énergie pour créer artificiellement du chauffage, du refroidissement et de la lumière.

En réponse aux différents climats présentés précédemment, l'architecture doit donc faire face à différents besoins selon la localisation. Ces besoins sont divisés entre chauffage et refroidissement. Il est donc normal que puisque la forme et l'orientation par rapport au soleil sont la base du design, on retrouve des formes types selon les climats. La Figure 10, résume ces formes. Une forme carrée en plan sera plus compacte et permettra de conserver la chaleur, tandis qu'une forme carrée avec un porche ouvert permet la protection au soleil et la ventilation naturelle.

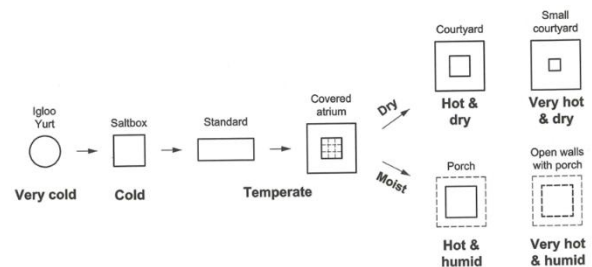


Figure 10 : Évolution de la forme en fonction du climat (source : LECHNER, 2014, p.16)

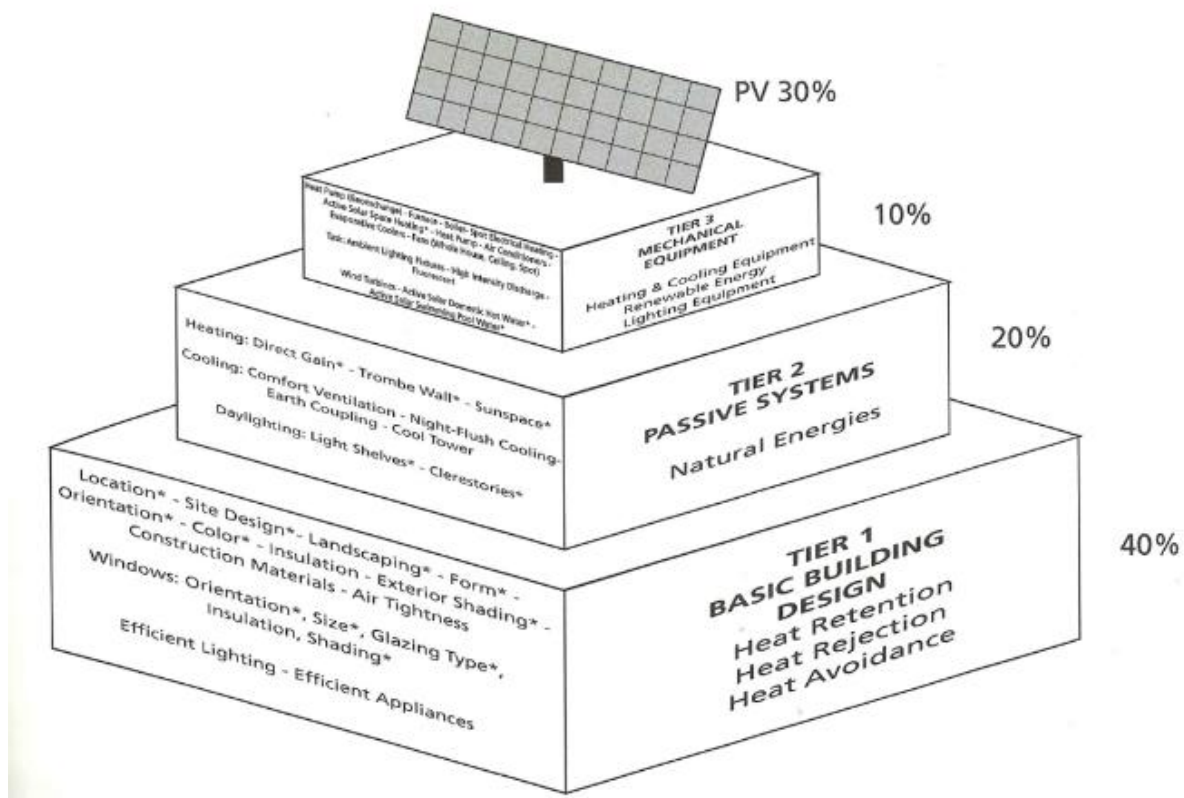


Figure 11 : Approche des trois tiers (Source : LECHNER, 2014, p.13)

Cette étude de la forme ne reste qu'un des éléments impactant l'efficacité énergétique. Basé sur l'architecture vernaculaire et l'ensemble des connaissances de l'être humain, ce résumé de la forme n'est qu'indicatif. Il existe une étude simple et rapide permettant de définir la forme idéale en fonction d'une zone climatique ;

L'approche sol-air de l'anglais « sol-air approach » est une simulation rapide qui étudie le rapport idéal de paroi exposée en fonction de l'orientation, de la forme et de la surface construite nécessaire. Présentée par Victor Olgay dans « *Design with Climate* », cette étude est le résumé de plusieurs théories sur le sujet. Elle consiste à prendre en compte la température de l'air et les radiations solaires propres au climat. Selon donc la température extérieure (donnant les besoins de chauffage/refroidissement de la zone) le bâtiment aura plus ou moins besoin des radiations solaires pour compenser les températures extérieures. Il convient donc d'utiliser la forme et son orientation afin d'éviter (ou d'utiliser) les radiations solaires. Basé sur un système d'optimisation à petite échelle, les simulations sont faites pour un ensemble de possibilités en hiver et en été. Une courbe tel celles présentées sur la Figure 12 est obtenue. Il convient donc de prendre l'optimum avec les déperditions les plus faibles en hiver et les plus hautes en été.

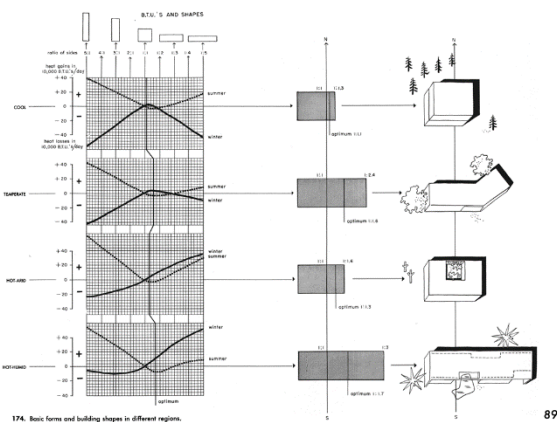


Figure 12 : Forme optimale selon la zone climatique (Source : OLYGAY, 2015, p.89)

Cette étude permet de donner des indications générales et reste sommaire. Malgré le fait qu'elle ne prenne que peu d'éléments en compte, elle permet d'éclairer les décisions et de comprendre les impacts de la forme.

La forme et l'orientation n'étant qu'une partie des éléments du premier tiers de LECHNER, il est évident qu'elle n'indira pas à elle seule une efficacité énergétique optimale. Les autres éléments tel que les matériaux et les parois (opaques et vitrés) seront traités avec plus de détail dans la partie 3.2. Mais un élément qui est entre

autres lié aux éléments du premier tier est l'utilisation de système passifs. Bien que ce dernier soit représenté par le deuxième tier, la position des fenêtres, l'utilisation de dispositifs d'ombrage est souvent liée aux systèmes passifs.

3.1.1.3_ Les solutions passives

Toujours lié au besoin défini par la zone climatique, un système passif aura donc pour but d'utiliser les éléments naturels et l'énergie qu'ils représentent pour la transcrire en chauffage ou en refroidissement (nous n'explorons pas la lumière dans cette recherche).

Les énergies naturelles à notre disposition sont donc :

- Le rayonnement solaire
- La pluie, brume, humidité dans l'air
- Le vent
- Le rayonnement produit par les êtres vivants (humains et animaux)
- La température du sol (et parfois humidité)

Face à chacune de ces énergies naturelles il conviendra donc de s'en protéger où de les utiliser. Par exemple dans les pays chauds on va favoriser la

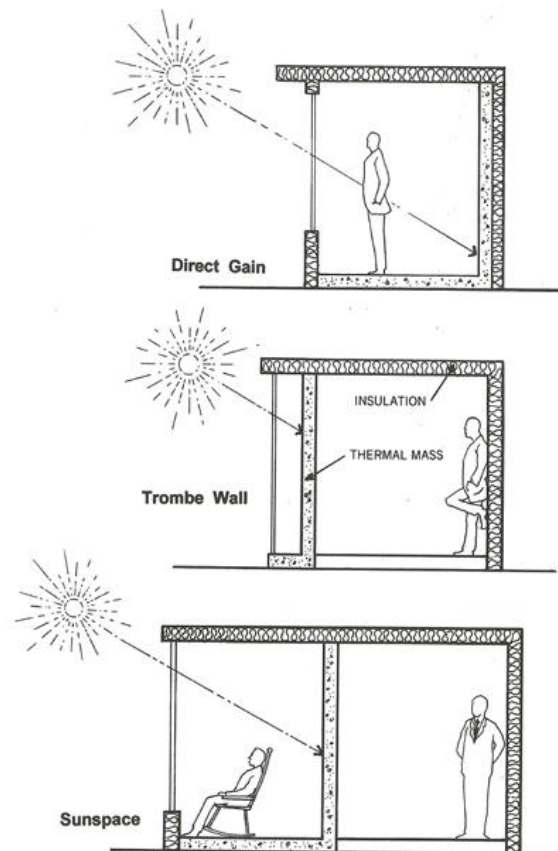


Figure 7.5a The three main types of passive solar space-heating systems are direct gain, Trombe wall, and sunspace.

Figure 13 : Les trois types principaux de chauffage solaire passifs avec gain direct (Source : LECHNER, 2014)

protection solaire, les murs très épais et l'utilisation du vent. Tandis que dans les pays froids, le rayonnement solaire va être utilisé pour chauffer l'intérieur et on va chercher à se protéger du vent.

Par exemple, la Figure 13 représente les trois principaux types de chauffage solaire passifs, utilisant la lumière du soleil à usage direct ou indirect. Au-delà de l'utilisation du rayonnement solaire, sa redistribution dans l'espace et dans le temps va varier selon les besoins et donc la zone climatique. Si la température extérieure en journée n'est pas suffisante, l'énergie solaire sera utilisée directement dans l'espace, et en revanche, s'il fait déjà assez chaud pendant la journée mais que le

besoin de chauffage intervient la nuit, cette énergie devra être stockée puis redistribuée.

Les variations d'utilisation de chaque énergie naturelle démontrent toute la complexité des solutions passives qui englobent et utilisent de nombreuses lois physiques.

La Figure 14 montre ici un exemple de maison passive qui utilise un ensemble de solutions passives pertinentes face au climat de Sante Fe au Nouveau Mexique.

Néanmoins, il est nécessaire d'avoir une certaine expérience pour connaître l'ensemble des solutions passives et de savoir quand les intégrer dans le projet. En réponse au graphique psychrométrique précédemment présenté (Figure 8), ce dernier complété des solutions passives permettant alors de visualiser la possibilité d'étendre la zone de confort (Figure 15). En effet, les solutions passives ayant un impact direct sur la température et l'humidité, il est donc de les situer sur le graphique. Cela permet en fonction de la condition climatique et d'un diagramme psychrométrique spécifique de savoir comment « amener » les valeurs en dehors de la zone de confort en élargissant cette zone de confort. Cette visualisation est très pertinente et efficace, elle permet une compréhension rapide de l'impact des solutions passives. Elle permet aussi d'identifier rapidement de savoir desquelles nous aurons besoin d'utiliser et souvent à quel degré.

Pour chaque solution passive utilisée, la zone de confort s'élargie, ayant pour but de couvrir l'ensemble des données.

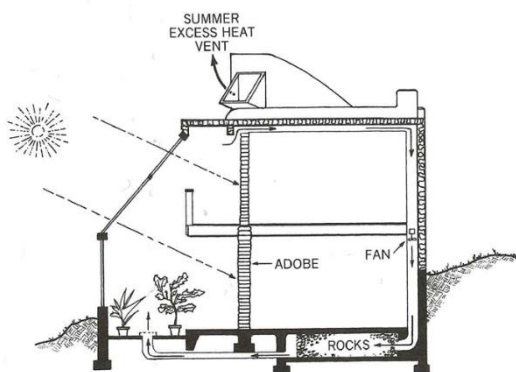


Figure 14 : Coupe schématique de la Balcomb House et de son fonctionnement passif (Source : LECHNER, 2014)

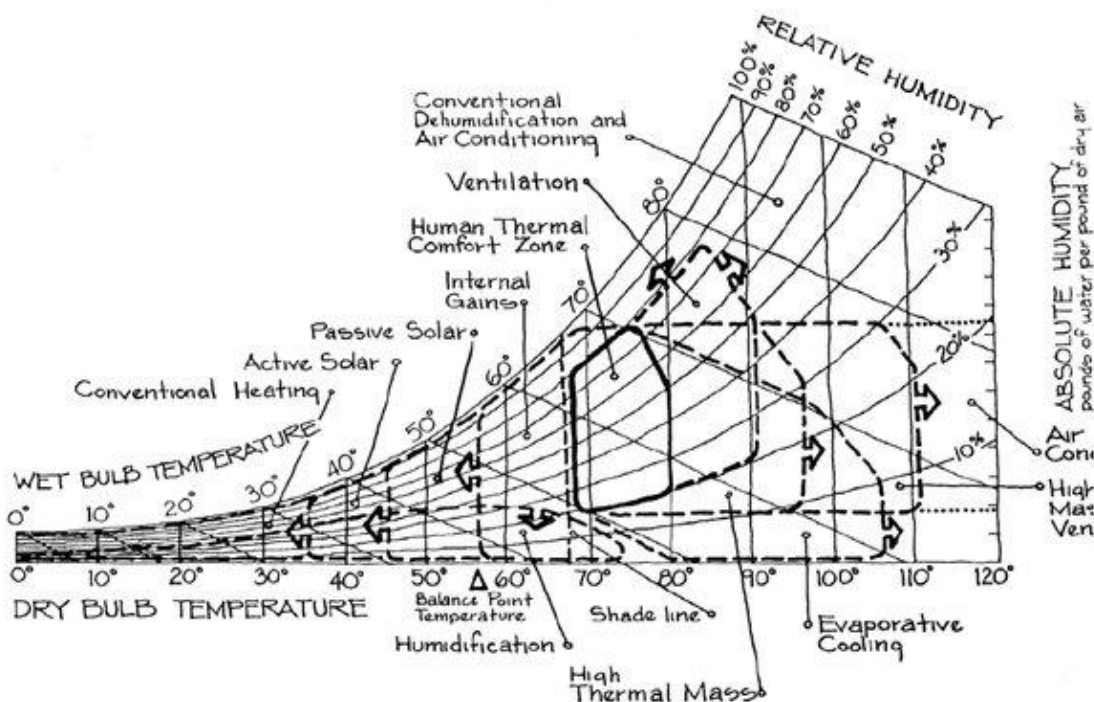


Figure 15 : « Givoni-Milne bioclimatic chart © 1981 (1981 ref. Diamond et al. 1993) » (Source : VISITAK et al., 2004)

3.1.2_ L'architecture vernaculaire

3.1.2.1_ Définition de l'architecture vernaculaire

L'architecture vernaculaire ou traditionnelle fait référence à une architecture propre à un pays, un lieu, à ses habitants. Fondé sur des traditions et une transmission du savoir localisée, l'architecture à su s'adapter à chaque culture, lieu, climat et ressource.

Dans la préface de « *Vernacular architecture in the 21th century* », écrite par Nezar AlSayyad (Architecte, urbaniste et historien), on retrouve une définition de l'architecture vernaculaire selon deux points de vue :

1. « *D'un point de vue étymologique, pour qu'un élément soit considéré comme vernaculaire, il a toujours été supposé qu'il devait être originaire ou unique à un lieu spécifique, produit sans avoir recours à des composants et des processus importés, et éventuellement construit par les personnes qui l'occupent.* »⁴⁸
2. « *Sur le plan épistémologique, c'est-à-dire en ce qui concerne nos modes de connaissance et de classification, la signification du terme « vernaculaire » doit également évoluer... Il y a de nombreuses années, lors de la première conférence de l'IASTE, Y-F. Tuan a fait valoir que la tradition est souvent le résultat d'une absence de choix. À ce titre, nous devons accepter la nature contraignante des pratiques vernaculaires. Nous devons accepter que le changement progressif qui s'opère dans l'architecture vernaculaire sur de longues périodes n'est pas le résultat de pratiques et d'une esthétique conservatrice, mais simplement de contraintes géographiques ou économiques qui ne peuvent être surmontées par une partie de la population locale d'une région.* »⁴⁹

Cette description de l'architecture vernaculaire présente en effet la notion de contrainte et d'utilisation des ressources locales. Comme introduit précédemment, les hommes des siècles passés n'avaient que très peu accès aux énergies modernes et tiraient donc partie des énergies naturelles. Cette approche du vernaculaire se fait

aussi par les architectes qui y trouve un intérêt. Notamment défendu par Gilles Perraudin⁵⁰ qui décrit son travail comme « *inspiré de l'architecture vernaculaire qui nous paraît apporter les réponses architecturales (et non pas technologiques) à des problèmes d'économie d'énergie* ». Et comme présenté précédemment, l'architecture nous intéresse pour les solutions qu'elle propose en lien avec les deux premiers tiers. Et ce parce que « *les meilleurs exemples d'architecture et de construction se trouvent dans les sociétés dont les ressources en matériaux et en énergie sont limitées* ». Là où l'architecture vernaculaire à su s'adapter, il est important de comprendre comment.

Cependant, l'architecture vernaculaire reste un ensemble complexe faisant à la fois référence à la tradition et à la culture. La complexité évidente de plusieurs siècles d'évolution est donc à prendre en compte lorsque l'on définit l'architecture vernaculaire. Simon Bronner définit cette versatilité du mot vernaculaire :

« *Si le terme « vernaculaire » implique une grammaire générative, fondée sur la culture, pour les textes matériels, alors les traditions font référence à l'apprentissage qui génère les expressions culturelles et à l'autorité que détiennent les précédents. Cette conception de la tradition comme processus de partage social des connaissances et de transmission à travers le temps et l'espace est à l'origine de la conceptualisation d'un modèle d'explication de l'architecture vernaculaire.* »⁵¹

La complexité d'un tel sujet implique une étude poussée afin d'en comprendre les mécanismes. Aujourd'hui, « *l'approche la plus courante consiste à copier certaines qualités formelles (forme, volumétrie, détails, etc.)* »⁵² au dépend de réelle réflexion menée par les civilisations passées.

3.1.2.2_ Étude de l'architecture vernaculaire

Introduit dans la partie 2.1, l'approche d'Amos Rapoport (Psychologue, professeur et architecte) présente l'importance de l'approche du vernaculaire :

« *Pourquoi étudier le design vernaculaire ? Pour en tirer des enseignements. Le meilleur moyen d'y parvenir est de considérer le design vernaculaire comme un système modèle.* »⁵³

⁴⁸ Traduit de l'anglais. ASQUITH, Lindsay et VELLINGA, Marcel, 2006. *Vernacular Architecture in the 21st Century: Theory, Education and Practice*. Taylor & Francis.

⁴⁹ Ibid.

⁵⁰ PERRAUDIN, Gilles, 2013. *Construire en pierre de taille aujourd'hui : musée des vins et jardin ampélographique, Patrimoine, Haute-Corse*. Presses du réel.

⁵¹ Ibid. p.24

⁵² Ibid.

⁵³ Traduit de l'anglais. ASQUITH, Lindsay et VELLINGA, Marcel, 2006. *Vernacular Architecture in the 21st Century: Theory, Education and Practice*. Taylor & Francis.

Il décrit l'entièreté de son approche dans le chapitre 10 de « *Vernacular architecture in the 21th century* », intitulé « *Vernacular design as model system* ». L'étude du vernaculaire comme modèle nécessite dans un premier temps un minimum de donnée afin d'utiliser un échantillon représentatif. Sur cette base, il proclame le développement de « concepts, principes, généralisation, de mécanismes... » afin de pouvoir utiliser ces derniers dans la conception aujourd'hui.

Représenté par la Figure 16, introduite comme référence dans l'introduction de Torben Dahl de l'architecture vernaculaire dans son livre « *Climate and Architecture* ».

Il introduit notamment une méthode d'analyse qu'il a lui-même développée intitulée Environment-Behaviour Studies (EBS : Études des comportements environnementaux). Cette méthode propose une étude approfondie des systèmes et concepts utilisés dans leur globalité. Comme il le souligne lui-même : « *la seule approche valable consiste à tirer des enseignements et des principes plus ou moins généraux en analysant les environnements vernaculaires à l'aide des concepts, du modèle et autres outils EBS, puis à appliquer ces enseignements à la conception.* »⁵⁴

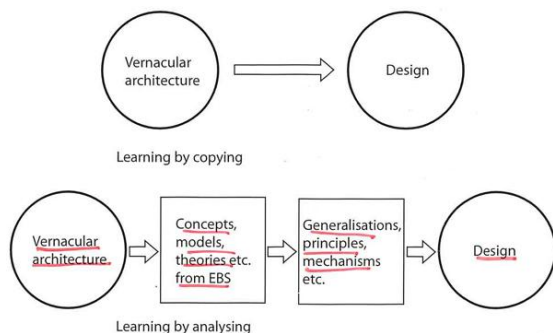


Figure 16 : Méthodologie d'Amos Rapoport pour l'analyse du vernaculaire (Source : DAHL, 2010)

L'étude fondamentale EBS repose sur trois questions essentielles :

- 1) Les caractéristiques biosociologiques, psychologiques et culturelles des êtres humains...

...qui influencent la manière dont ils interagissent avec leur environnement bâti et climatique. Il s'agit d'analyser comment les besoins, comportements et perceptions de l'homme, propres à chaque contexte climatique et culturel, orientent la conception des espaces et des bâtiments.

- 2) Les effets des environnements sur les êtres humains

C'est-à-dire la manière dont l'espace construit et les conditions climatiques impactent le confort, la santé et le bien-être des occupants. Cette analyse ne cherche pas à proposer des solutions uniques, mais à comprendre les interactions et à identifier les conditions qui favorisent ou entravent le confort et la performance, laissant ensuite place à des choix adaptés.

- 3) Les mécanismes qui relient les personnes et les environnements

...

...autrement dit les principes et stratégies qui permettent de mettre en relation les besoins humains avec les caractéristiques des espaces construits. Les solutions architecturales ou techniques ne sont alors que des manifestations concrètes de ces mécanismes et doivent être envisagées comme des options parmi d'autres, guidées par une compréhension approfondie des interactions entre l'homme et son environnement.

Comme tout élément naturel, l'être humain relève d'une complexité importante et nécessite donc une étude physiologique, biologique, culturelle,

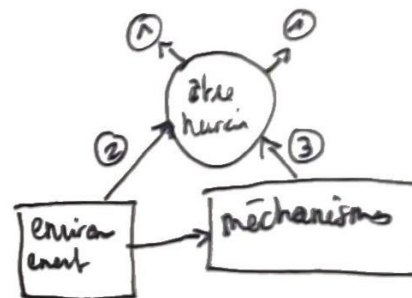


Figure 17 : Schéma méthode EBS (Source : Auteur)

anatomique, etc. L'architecture vernaculaire, pour être comprise correctement, doit-être traitée de la même manière.

Dans ce sens, l'architecture bioclimatique faisant référence à une architecture construite autour de l'être humain et en fonction de l'environnement et des ressources disponibles, n'est que la science derrière l'architecture vernaculaire. Les études récentes et le développement de principes généraux permet aujourd'hui une étude approfondie de ces architectures.

L'architecture vernaculaire représente donc une base de données de construction n'utilisant (presque uniquement) que les deux tiers présentés plus tôt.

⁵⁴ Ibid.

3.1.2.3_ L'architecture vernaculaire et le monde moderne

Aujourd'hui, il est donc question d'utiliser ces méthodes afin de tirer parti des savoirs faire anciens. Mais ce n'est pas si simple. L'architecture bioclimatique et vernaculaire renvoie à des modes de production du passé. Aujourd'hui, l'ancrage de l'industrialisation de la construction et de l'architecture change bien des choses. Interviewé par Valéry Didelon, Gilles Perraudin explique s'être « rendu compte assez vite que les processus de production industriels sont incompatibles avec cette approche vernaculaire. L'homme n'est pas au cœur des préoccupations de l'industrie. »⁵⁵

Et en effet, « la question du vernaculaire n'est pas formelle, mais avant tout politique et économique »⁵⁶. La société actuelle ne permet pas pleinement l'intégration de ces principes dans l'architecture. De plus, elle est encore perçue comme la production d'une population arriérée alors que les bâtiments des dernières années ne sont pas efficaces thermiquement (partie 2.1).

En effet, un regain d'intérêt pour l'architecture vernaculaire s'est porté en France et dans le monde entier dans les années précédentes en lien avec la crise de l'énergie. L'étude du vernaculaire se fait alors sous un angle thermique et climatique, couplé au développement de l'approche bioclimatique.

COJOCARU et ISOPESCU (2021), le décrivent bien dans la conclusion de leur article publié sur le sujet :

« Les stratégies passives peuvent être utiles encore aujourd'hui, les enseignements tirés de l'architecture vernaculaire et des bâtiments anciens devraient constituer la base de l'architecture actuelle. [...] Les enseignements tirés de l'architecture vernaculaire soulignent l'importance d'une approche de la conception des bâtiments tenant compte du climat afin d'assurer le confort humain sans détruire l'harmonie avec la nature. Les architectes contemporains devraient trouver un équilibre entre l'utilisation d'éléments vernaculaires traditionnels et l'utilisation de techniques passives innovantes afin d'obtenir une médiation parfaite entre l'extérieur (climat local) et l'intérieur confortable des bâtiments. »⁵⁷

En effet, ils affirment de cette manière que cela n'est toujours pas le cas. Du même avis, Gilles Perraudin en 2012, affirmait qu'il imaginait « peut-être un peu naïvement, que les technologies les plus avancées

nous permettraient de renouer avec un certain esprit vernaculaire. »⁵⁸ L'étude contemporaine du vernaculaire se fait en même temps que le développement des outils numériques (les technologies les plus avancées).

3.1.3_ Un zoom sur la France

Après avoir présenté les prémices de la forme et des solutions passives par l'approche bioclimatique et de l'architecture vernaculaire, nous devons nous intéresser à l'ensemble de ces questions, en France.

En effet, la situation climatique, les besoins, les architectures vernaculaires et les solutions passives propres aux ressources locales sont spécifique à chaque lieu.

Nous allons donc nous intéresser dans un premier temps au climat tempéré et des particularité climatiques en France. Cette présentation générale, induira les besoins généraux auxquels doit répondre l'architecture en France pour faire face à ce climat.

Dans un second temps nous présenterons rapidement l'architecture vernaculaire en France, les ressources disponibles, les grandes lignes.



Figure 18 : Classification des climats de Köppen-Geiger présentée sur son site officiel et visualisable sur Google Earth (Source : <https://koepfen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm>)

⁵⁵ NUSSAUME, Yann, PERRAUDIN, Gilles et DIDELO, Valéry, 2012. Gilles Perraudin. Dijon : Les presses du réel. Collection architecture. p.111.

⁵⁶ Ibid.

⁵⁷ COJOCARU, Alexandra et ISOPESCU, Dorina, 2021. Passive Strategies of Vernacular Architecture for Energy Efficiency.

Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section. 1 juin 2021. Vol. 67, pp. 33-44.

⁵⁸ NUSSAUME, Yann, PERRAUDIN, Gilles et DIDELO, Valéry, 2012. Gilles Perraudin. Dijon : Les presses du réel. Collection architecture. pp.111.

Dans un troisième temps, sera présenté les différentes solutions passives pertinentes en France et selon les différents climats français.

3.1.3.1_ La France : un climat tempéré hétérogène

La France est localisée à l'est de l'Europe dans l'hémisphère nord. Sa capitale, Paris, est localisée selon les coordonnées suivantes : 48°52'N, 2°19,59'E.

Suivant le système de classification des climats de Köppen-Geiger présenté précédemment, la France est considérée comme un climat tempéré, exprimé en nuances de vert dans la Figure 18.

Qu'est-ce qu'un climat tempéré ?

Un climat tempéré est caractérisé par une température équilibrée au long de l'année et comprenant des différences saisonnières importantes. Le climat tempéré est donc souvent associé à des températures qui oscillent autour de la zone de confort de l'être humain, défini précédemment à 20-24°C. On retrouve des températures pour les mois les plus froids entre 0°C et 18°C et pour les mois les plus chauds au-dessus de 10°C. Caractérisé le plus souvent par des saisons bien définies.



Figure 19 : Présentation des cinq climats en France par Météo France (Source : Météo France, 2023)

Ceci dit, il existe différents types de climats tempérés, au nombre de neuf selon cette classification. Ils se distinguent par diverses combinaisons de précipitations (humidité saisonnière) et de températures (intensité des variations thermiques). La France présente majoritairement un même type de climat sur sa partie nord et ouest, noté *Cfb*. Dans le sud, quelques variations apparaissent — *Csa*, *Cfa*, *Csb* — mais elles restent globalement dans la catégorie tempérée.

Concernant les zones de montagne, elles représentent un cas particulier. Bien qu'elles couvrent une certaine partie du territoire français, elles se caractérisent par des altitudes et des conditions climatiques spécifiques qui les distinguent partiellement du climat tempéré : les températures diminuent avec l'altitude, les amplitudes thermiques se modifient, et les réponses architecturales y sont nécessairement adaptées à ces contraintes. Or ces zones, bien que spatialement importantes, ne constituent pas la majorité des espaces habités étudiés ici et s'éloignent du cadre climatique sur lequel porte cette recherche.

Ainsi, le présent travail se concentre sur les climats tempérés majoritaires du territoire français, sans intégrer les spécificités propres aux climats montagnards.

C/f/b : Climat tempéré / humide toute l'année / été mi-chaud (warm)

C/s/a : Climat tempéré / été sec / été chaud

C/f/a : Climat tempéré / humide toute l'année / été chaud

C/s/b : Climat tempéré / été sec / été mi-chaud (warm)

On comprend alors à travers ces variations que les différences se font sur l'humidité de l'air qui varie selon les saisons ou non ainsi que l'intensité des températures en été. Afin de simplifier l'étude de ces climats, nous allons désormais poursuivre avec les deux climats suivants : *Cfb* et *Csa*.

Le climat *Cfb* est plus communément appelé climat océanique. Il représente alors un climat tempéré chaud sans saison sèche, caractérisé alors par des précipitations tout au long de l'année.

Le climat *Csa* est plus communément appelé climat méditerranéen. Il est caractérisé par un climat tempéré chaud avec été sec.

Néanmoins il est pourtant important de nuancer que l'humidité de l'air dépend aussi de l'altitude, de la vitesse du vent qui influence elle aussi sur la température ressentie et non uniquement sur la température ambiante moyenne. Il est donc courant d'entendre parler de plusieurs variations de climats

en France comme le présente le site de météo France sur la Figure 19⁵⁹. Les zones climatiques ici présentes sont utilisées dans la réglementation depuis la RT2012 jusqu'à la RE2020 (Figure 20 et Figure 21). On y retrouve trois grandes zones H1, H2 et H3 découpées en sous-zones. La zone H1 correspond au climat océanique, la zone H2 au climat semi-continentale et la zone H3 au climat méditerranéen. Cette répartition ne prend pas en compte le climat de montagne introduit plus tôt.

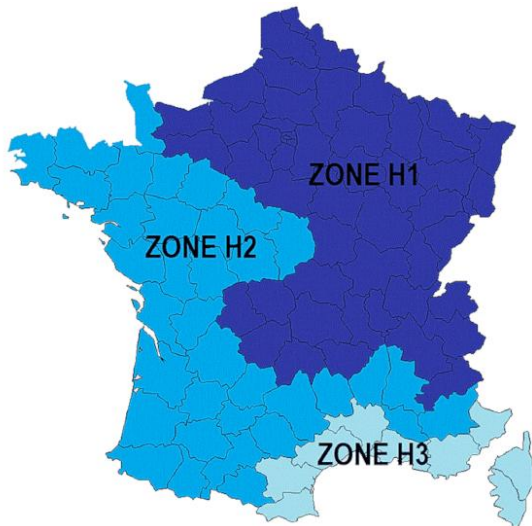


Figure 20 : Grandes zones climatiques de la RT2012 et RE2020 (Source : calculcee.fr)

Les composantes climatiques en France

Ce même site de météo France présente alors 3 différentes cartes présentant le niveau des températures moyennes, des pluies et des jours d'ensoleillement.

Sur la carte des températures moyennes annuelles (Figure 22) on représente ici une division en 4 parties distinctes du climat en France. Le Nord et l'est de la France, l'Ouest de la France, la zone méditerranéenne et les zones de montagne.

La carte des moyennes annuelles des hauteurs de précipitations (Figure 25) présente une répartition plus éparse avec des zones sèches au centre nord de la France et en méditerranée, des zones plus soumises aux précipitations le long des côtes ouest et nord. Puis les zones les plus humides dans les zones de montagne. Une analyse différente de celle présentée précédemment qui ici accentue sur le taux de précipitation et non forcément sur l'humidité de l'air. Présentant ici une intensité des pluies et non une occurrence.

Cette carte des moyennes annuelles des jours de pluie à quantité de précipitations égales (Figure 24), présente alors une lecture plus proche de celle de la classification des climats. On lit alors que le sud de la France est en effet moins soumis à des pluies fréquentes et une humidité persistante mais plutôt à des pluies intenses de courtes durées présentes lors d'événements ponctuels.

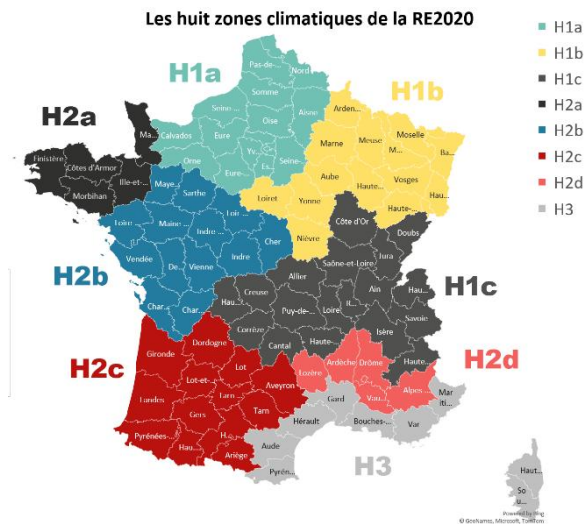


Figure 21 : Zone climatiques de la RT2012 et de la RE2020 (Source : Wikipédia)

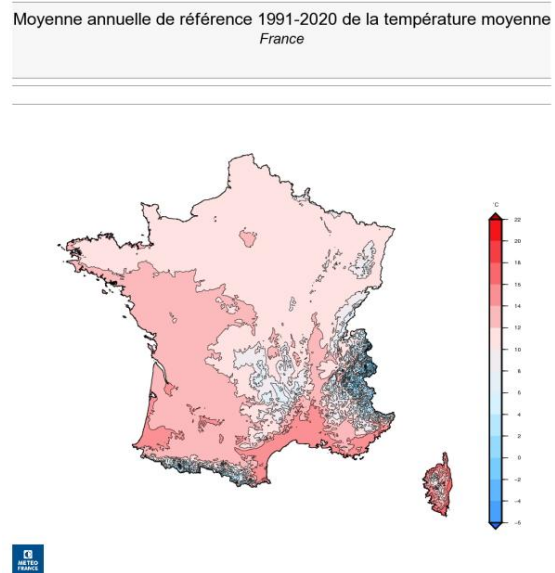


Figure 22 : Moyenne de la température annuelle (Source : Météo France, 2023)

⁵⁹ Le climat en France métropolitaine | Météo-France. Disponible à l'adresse : <https://meteofrance.com/comprendre-climat/france/le-climat-en-france-metropolitaine>

La Figure 26 montre ici la quantité d'ensoleillement en nombre d'heure sur l'année. La différence est vraiment importante entre la zone méditerranéenne et le reste de la France qui dispose presque du double d'heures d'ensoleillement. Étant plus proche de l'équateur et ayant un ciel moins couvert à l'année, le soleil touche plus cette zone de la France.

ressemblent grandement. La différence se fait ici en lien avec la latitude et donc de l'angle d'incidence entre le soleil et la terre. Le sud de la France bénéficie donc un ensoleillement plus fréquent et plus puissant, induisant les différences de températures présentées plus tôt et marquant le climat méditerranéen.

La carte suivante (Figure 23), présentant l'intensité moyenne annuelle par jour des radiations solaires (kWh/m^2) montre qu'il est important de relier les deux cartes afin de faire la différence entre l'occurrence et l'intensité même si les deux cartes se

Moyenne annuelle de référence 1991-2020 du nombre de jours avec RR \geq 1mm
France

Moyenne annuelle de référence 1991-2020 des précipitations
France

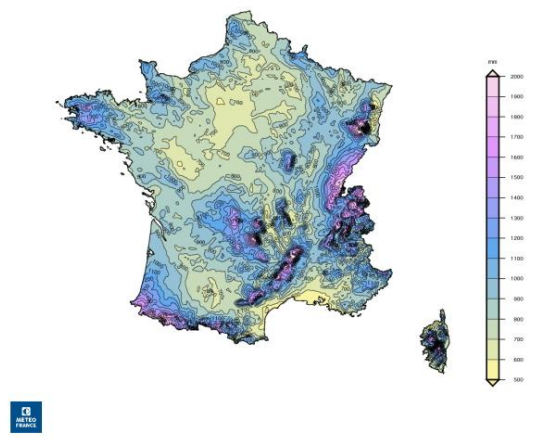
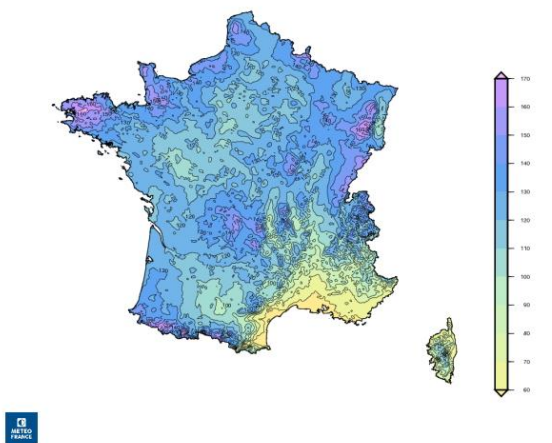


Figure 25 : Moyenne annuelle du nombre de jour avec une pluie journalière significative (Source : Météo France, 2023)

Figure 24 : Moyenne annuelle des précipitations (Source : Météo France, 2023)

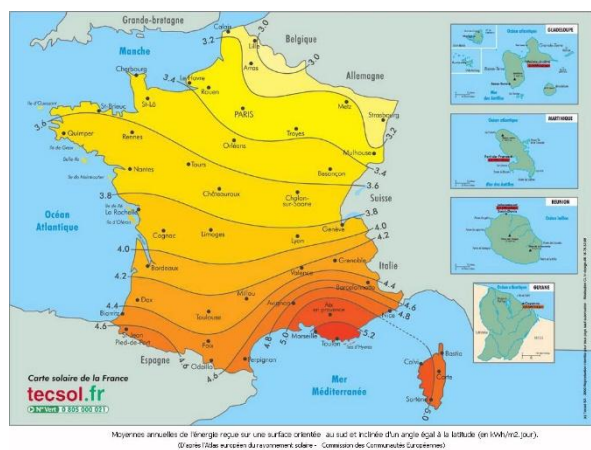
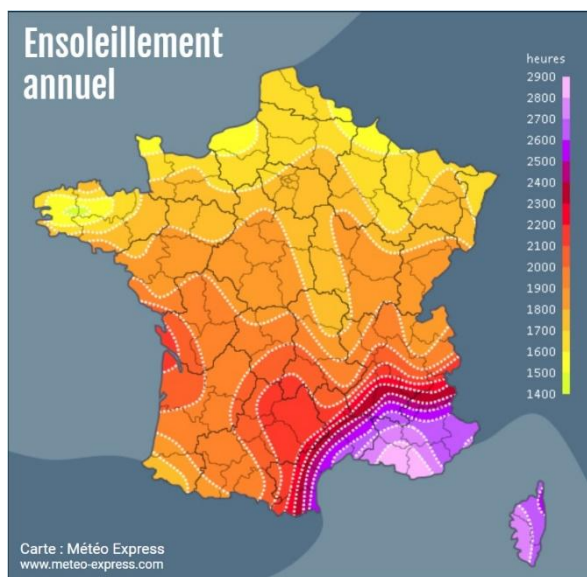


Figure 26 : Ensoleillement annuel en nombre d'heure (Source : Météo France, 2023)

Figure 23 : Moyenne annuelle de l'énergie solaire reçue sur une façade orientée au sud et incliné d'un angle égal à la latitude en $\text{kWh/m}^2/\text{jour}$ (Source : Tecsol)

3.1.3.2_ Les besoins en réponse au climat tempéré Français

Le climat tempéré est donc globalement proche de la zone de confort. Une particularité du climat tempéré est qu'il existe une différence saisonnière et que donc les besoins ne seront pas les mêmes selon les saisons. De plus, les différences se font aussi à l'échelle d'une journée entre le jour et la nuit.

Les besoins généraux sont le chauffage presque toute l'année sauf l'été avec plus ou moins besoin de refroidissement selon la position en France.

Le sud de la France au climat méditerranéen nécessite un traitement différent du reste de la France étant donné qu'il bénéficie de plus d'ensoleillement et plus puissant, de moins de précipitation et d'humidité. Il existe donc des besoins différents auxquels doit répondre l'architecture selon la localisation en France.

D'après la lecture de ces cartes on définit donc que l'on va devoir utiliser le soleil toute l'année dans le nord de la France et peut-être s'en protéger légèrement en été. Tandis que dans le sud de la France, l'utilisation de l'énergie solaire ne se fera qu'en hiver et le bâtiment devra s'en protéger durant l'été pour éviter un besoin de refroidissement.

La protection et la gestion de la pluie et de l'humidité de l'air sera plus importante dans la partie nord et au centre de la France que dans le climat méditerranéen.

Il existe encore de nombreuses différences, les climats étudiés dans les cas d'études seront présentés plus en détails dans la partie 4.2.

Gilles Perraudin distingue deux besoins thermiques fondamentaux : se réchauffer en hiver et se refroidir en été. Selon lui, « *se réchauffer n'est pas très compliqué* », l'essentiel étant d'« *apporter du confort à l'habitant plutôt qu'à la maison* ». À l'inverse, il souligne que la thermique d'été est « *plus complexe* », car produire du froid demande « *trois fois plus d'énergie que produire de la chaleur* »⁶⁰, rendant la climatisation particulièrement coûteuse dans un contexte d'épuisement des ressources.

S'il a raison de rappeler que le rafraîchissement est plus énergivore que le chauffage, la réalité française montre que la demande annuelle en chaleur reste de loin la plus importante, environ dix fois supérieure à celle du refroidissement (voir analyses section 4.2). Le climat tempéré impose ainsi un besoin marqué de chauffage en hiver et en mi-saison, tandis que le rafraîchissement reste

ponctuel. Toutefois, l'énergie mobilisée pour contrer le froid hivernal peut favoriser des surchauffes estivales, ce qui exige des solutions compatibles avec les différentes saisons.

À cela s'ajoute l'humidité caractéristique des périodes froides, conséquence des précipitations fréquentes et d'une faible évaporation, imposant une gestion précise de l'humidité intérieure. En somme, les besoins varient à la fois au cours d'une journée et d'une année entière, révélant toute la complexité du climat tempéré et la nécessité d'approches architecturales capables de répondre à cette diversité de situations.

Pour ajouter, en lien avec la pierre et le besoin de chauffage en hiver, Gilles Perraudin disait aussi dans le même ouvrage : « *Le problème auquel il a cependant fallu faire face de tout temps c'est celui de l'inconfort ressenti en hiver. La pierre absorbe le rayonnement infrarouge émis par le corps. C'est l'effet de paroi froide. Mais comme je l'ai déjà dit, au Nord comme au Sud, le vrai problème est moins de se réchauffer en hiver que de se rafraîchir en été. Le vrai clivage n'est pas entre le Nord et le Sud, mais entre les zones continentales et côtières. Sur les littoraux, au bord des mers ou des lacs qu'elles soient au Nord ou au Sud, l'inertie est procurée par la masse d'eau qui atténue les écarts de température entre l'hiver et l'été. Le seul problème est alors la présence d'humidité qu'il faut combattre par la ventilation.* »⁶¹

⁶⁰ NUSSAUME, Yann, PERRAUDIN, Gilles et DIDELON, Valéry, 2012. Gilles Perraudin. Dijon : Les presses du réel. Collection architecture. p.114.

⁶¹ Ibid. pp.121.

3.1.3.3_ Une architecture traditionnelle : échelle nationale

En réponse à ce climat tempéré il convient d'introduire les différentes ressources disponibles en France, les réponses de l'architecture vernaculaire et les solutions passives pertinentes pour la France.

Formes et orientation du bâti

La réponse généralisée au besoin de chauffage dans la plupart des régions de France résulte d'une orientation au sud. Située dans l'hémisphère nord, l'orientation du soleil en pleine journée est au sud.

Cette situation, alignée au besoin de chauffage et donc de l'utilisation solaire mène à étendre la forme carrée des climats froids pour un rectangle avec une façade longue exposée au soleil. De cette manière le bâtiment ouvre la face exposée sud et utilise le rayonnement solaire. Néanmoins, de nombreuses variantes de cette forme sont apparues en France en réponse aux différents besoins locaux, parfois autre que l'efficacité énergétique. Néanmoins, l'architecture vernaculaire tourne autour de cette forme. Elle se dérive au Nord de la France avec des édifices plus allongés et Sud de la France avec des maisons à cour, patio ou en U.

Matériaux disponibles pour la construction

Les matériaux disponibles sur le territoire français et qui ont permis de créer l'architecture du patrimoine sont :

- La pierre
- Le bois
- La terre
- La paille
- La terre
- Le chaume

Chaque matériau a été utilisé avec de nombreuses variations et on retrouve leurs utilisations selon les zones climatiques. Par exemple avec les maisons à colombage (bois et torchis) dans le Nord de la France et les maisons en terre cuite dans le sud de la France. Néanmoins, deux matériaux se sont développés et ont recouverts l'entièreté de la France, la pierre et le bois. La pierre a été utilisée pour son abondance, sa durabilité et sa facilité de mise en œuvre, l'architecture vernaculaire française est majoritairement édifiée en pierre (on parle des murs et fondations). Et le bois a été utilisé de la même manière pour sa durabilité et facilité de mise en œuvre pour les charpentes et menuiseries.

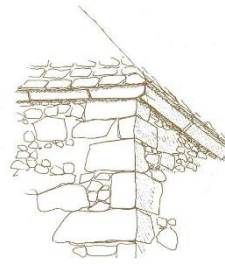


Figure 27 : La pierre (Source : BOITHIAS et MONDIN, 1979)



Figure 28 : Maison à colombage (bois et torchis) (Source : BOITHIAS et MONDIN, 1979)

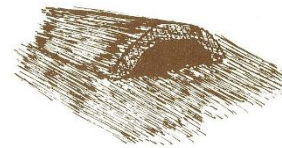


Figure 29 : Le chaume (Source : BOITHIAS et MONDIN, 1979)

Solutions passives

Les solutions passives présentées précédemment (partie 3.1.1), interviennent donc dans une optique d'adapter le besoin présenté par le climat pour en offrir une réponse, d'où le nom de solution.

« *Un avantage d'une conception de qualité est que la maison devrait maintenir une température intérieure confortable tout au long de l'année sans avoir recours à des méthodes de chauffage et de climatisation coûteuses.* »⁶²

Les solutions passives sont implémentées depuis bien longtemps dans l'architecture vernaculaire et ont été utilisées. Celles adaptées pour le climat tempéré doivent donc :

- Fonctionnement saisonnier, car besoins différents toute l'année
- Alternner en fonction de l'heure de la journée selon les besoins aussi

Quelques solutions passives utilisées en France :

- Chauffage passif solaire
- Paroi entre inertie et isolation (colombage et structure bois)
- Protection contre la pluie
- Gestion de l'humidité

⁶² Traduit de l'anglais : "A benefit of good design is that the house should maintain a comfortable year-round indoor temperature without resorting to costly heating and cooling methods." Dans :

GUNN, Sarah, 2012. Stone House Construction. Australia : CSIRO. p.3

1) Conserver les apports internes

Conserver les apports internes consiste à utiliser le dégagement de chaleurs produits à l'intérieur par les usagers ou les équipements. A l'époque, cela se traduisait notamment par l'utilisation de la chaleur dégagée par le bétail. Gilles Perraudin disait qu'« *en Suisse ou en Savoie par exemple, les constructions sont ainsi faites. Il y a un soubassement, les animaux vivent en dessous et chauffent les gens qui sont au-dessus. Ce genre de dispositif spatial est à l'origine de bien de mes projets.* »⁶³ Ce dispositif a aussi été utilisé en France. Le bétail vivait dans la même pièce ou dans une pièce annexe à la maison.

De nos jours, la société ayant évolué, les apports internes font référence aux usagers et aux équipements électriques.

2) Masse Thermique Élevée – Inertie thermique

L'inertie permet de répondre au besoin de différence entre la journée et la nuit. Le déphasage thermique permet de capter les hautes températures causées par les radiations solaires durant la journée pour les restituer la nuit lorsque la température extérieure est faible. La température à l'intérieur devient alors stable et offre un confort pour l'être humain. DAHL le présente bien dans *Climate and Architecture* (Figure 30) et montre l'adaptation de la température intérieure par rapport à la température extérieure pour une maison en pierre.

La France étant dans un climat tempéré, le déphasage thermique fait partie des solutions passives adaptée. Néanmoins, cette solution est adaptée aux besoins d'été et peut poser problème l'hiver car les températures extérieures peuvent être très faible.

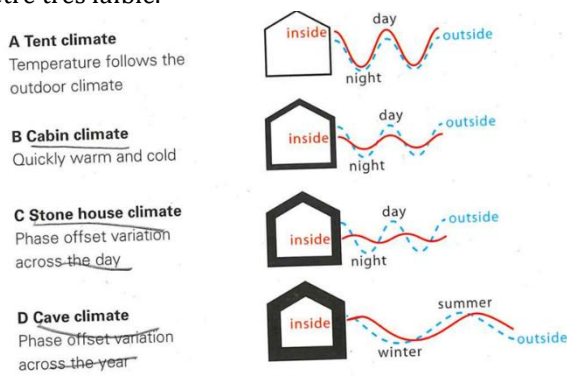


Figure 30 : Comparaison entre les différences de température journalière entre intérieur et extérieur selon les différents types de parois (Source : DAHL, 2010)

⁶³ Gilles Perraudin. Dijon : Les presses du réel. Collection architecture. ISBN 978-2-84066-416-1. p.111.

3) Protections solaires

Cette stratégie permet de réduire l'entrée des radiations solaires directes à l'intérieur (par les fenêtres) afin de réduire le transfert de chaleur ainsi que la quantité de lumière si nécessaire. Les protections solaires permettent selon leurs orientations de bloquer l'entrée du soleil à un moment précis. Par exemple, un débord de toiture permettra de protéger une fenêtre d'un ensoleillement direct en été mais de laisser les radiations entrer en hiver. Il peut aussi se faire horizontalement pour bloquer le soleil de l'est ou de l'ouest. Les protections solaires permettent de gérer les différents besoins saisonniers. Ces dispositifs peuvent prendre différentes formes, position de végétation, brise soleil, store, débord de toiture, etc.

4) Utilisation des radiations solaire

L'utilisation des radiations solaires pour chauffer l'intérieur fait référence au chauffage passif. L'orientation des parois vitrées et du bâtiment doit donc se faire par rapport à la course du soleil. Comme le démontre la Figure 13 présentée plus tôt, le chauffage passif peut se faire de différentes manières. Il est question de savoir ce que l'on chauffe avec le soleil, l'air de la pièce, une paroi, une pièce annexe. Pour les maisons en pierre, la gestion des radiations solaires joue un rôle très important et notamment en lien avec l'inertie thermique. Dans *Stone House Construction*, GUNN avance que :

« *Le placement judicieux des fenêtres, l'utilisation de murs en pierre massifs et l'isolation du toit permettront de réduire les charges (et les coûts) de chauffage et de climatisation pendant de nombreuses années.* »⁶⁴

5) La forme construite

La forme construite fait référence au ratio entre la surface au sol et la surface de façade exposée selon le besoin d'augmenter ou de diminuer les déperditions de chaleur. Présenté aussi plus tôt, les formes sont souvent propres à la condition climatique bien qu'elles soient adaptables.

GUNN présente bien cette idée dans son ouvrage sur la construction d'une maison en pierre en Australie (le Nord équivaut au Sud pour les radiations solaires dans l'hémisphère sud, il convient donc d'inverser les orientations) :

⁶⁴ Traduit de l'anglais : "Careful placement of windows, the use of massive stone walls, and roof insulation will reduce heating and cooling loads (and costs) for years to come." Dans : GUNN, Sarah, 2012. *Stone House Construction*. Australia : CSIRO. p.19.

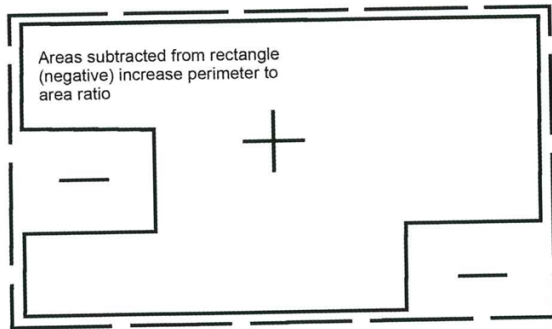


Figure 31 : Impact du ratio entre surface de façade et surface au sol (Source : GUNN, 2012)

« Un mur nord plus long améliore le contrôle solaire via les fenêtres. Minimiser le rapport entre le périmètre des murs extérieurs et la surface au sol réduit les pertes de chaleur globales ainsi que les coûts de construction. Pour optimiser à la fois le contrôle solaire et les flux thermiques, dans un climat tempéré, la maison doit présenter des proportions d'environ 1,5 pour 1 entre un mur nord bien vitré et les murs est et ouest fermés. Dans les climats plus chauds, cette proportion doit être moindre, car les besoins en lumière solaire hivernale sont moins importants. »⁶⁵

En effet, limiter la surface de façade exposée permet de limiter les déperditions thermiques, de plus toute extrusion de la forme comme le montre la Figure 31.

4) Protection contre la pluie

Il est question de limiter ou éviter la pénétration d'humidité à l'intérieur du bâtiment. Il est nécessaire de protéger les façades de la pluie et des infiltrations, il faut donc concevoir un toit adapté aux quantités et aux types de pluies. Il est aussi question de concevoir correctement les soubassements des murs en pierre

5) Protection contre le vent

La protection contre le vent vise à limiter les infiltrations d'air non maîtrisées afin de réduire les pertes thermiques et l'inconfort ressenti à l'intérieur du bâtiment. L'utilisation de murs pignons opaques et peu ouverts sur les façades exposées permet de faire écran aux vents dominants et de stabiliser les conditions intérieures.

6) Utilisation du vent et ventilation naturelle

La ventilation naturelle est exploitée comme un levier de rafraîchissement passif, en favorisant la circulation de l'air à travers le bâtiment. L'organisation autour d'un patio permet de capter les vents dominants, de créer des courants d'air traversants et d'abaisser la température de l'air intérieur et des espaces adjacents pour les climats tempérés plus chaud. La ventilation naturelle se fait grâce à un placement réfléchi des ouvertures permettant une continuité des flux d'air.

7) Protection contre les températures froides

La réduction de l'impact des températures extérieures froides repose sur une conception limitant les échanges thermiques défavorables. L'implantation, la compacité du bâti et le traitement des parois permettent de maintenir un environnement intérieur plus stable et confortable malgré les variations climatiques. Cette solution passive fait référence à une isolation importante permettant de se protéger du climat extérieur.

8) Dessin de la cour

La cour est conçue comme un espace climatique modulable, pouvant être minéral ou végétalisé selon les besoins. Une cour végétalisée favorise le rafraîchissement par évapotranspiration, tandis qu'une cour plus minérale permet de capter les apports solaires. Son dessin permet ainsi de bloquer ou de laisser pénétrer les radiations solaires en fonction des saisons.

9) Gestion de l'humidité

La gestion de l'humidité repose sur la capacité du bâtiment à réguler les flux de vapeur d'eau grâce à des parois perspirantes. Le choix de matériaux hygroscopiques et une conception soignée des façades permettent une diffusion contrôlée de l'humidité, limitant les risques de condensation tout en assurant un confort hygrothermique intérieur durable.

10) Protection de l'entrée

La protection de l'entrée constitue une stratégie adaptée aux climats tempérés, permettant de créer

⁶⁵ Traduit de l'anglais : "A longer north wall improves sun control via windows. Minimising the ratio of external wall perimeter to floor area reduces overall heat loss as well as building costs. To optimise both sun control and heat flows, in a temperate climate, the house should have proportions of about 1.5 to 1 between a

well-glazed north wall and the closed east and west walls. In hotter climates, the proportion should be less, since there is less demand for winter sunlight." Dans : GUNN, Sarah, 2012. Stone House Construction. Australia : CSIRO. p.23

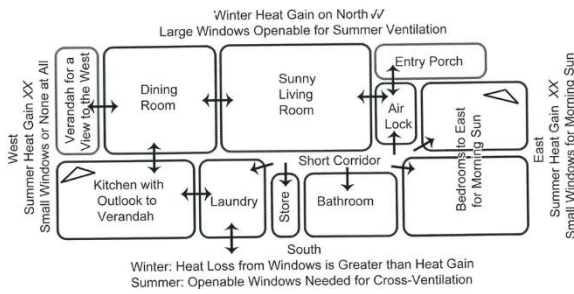


Figure 32 : Organisation spatiale adaptée au climat tempéré dans l'hémisphère sud (Source : GUNN, 2012)

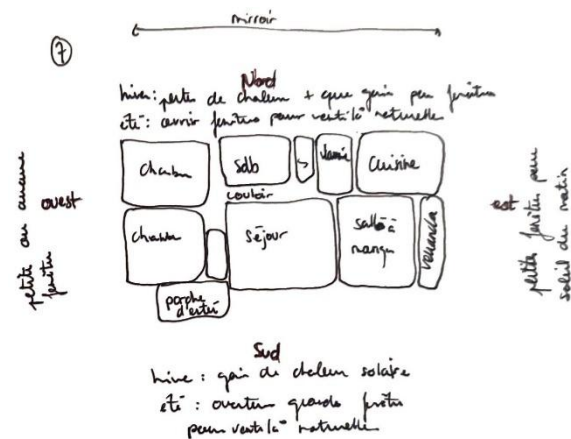


Figure 33 : Organisation spatiale adaptée au climat tempéré dans l'hémisphère nord (Source : Auteur)

une zone tampon entre intérieur et extérieur. Les dispositifs de couverture ou de retrait génèrent de l'ombre en été et protègent l'accès contre la pluie et le vent en hiver, améliorant ainsi le confort d'usage.

11) Espaces tampon

Cette stratégie, permet d'ajouter des espaces non chauffés, créant un environnement secondaire et donc une limitation des déperditions thermiques des espaces de vie vers l'extérieur. Comme le décrit Gilles Perraudin « l'architecture vernaculaire a en effet beaucoup à nous apprendre. À titre d'exemple, les espaces d'habitation sont par exemple souvent bordés sur leur côté exposé par des pièces de moindre confort où se conserve bien la fraîcheur. »⁶⁶ En effet, ces éléments font partie de l'organisation spatiale de la maison et sont à réfléchir avec les usages de chacune des pièces. Gilles Perraudin dans la même

interview présente rapidement la méthode de conception d'un de ses premiers projets :

« Le projet avec lequel j'ai remporté le concours européen des énergies solaires passives en 1980 s'inscrit parfaitement dans cette logique. C'est un projet de maison, organisé autour d'un noyau central, sur lequel viennent se greffer plusieurs chambres et alcôves, puis des excroissances latérales qui cette fois ne sont pas isolées. On passe progressivement de la forte à la faible inertie. Au nord du bâtiment, on trouve les espaces tampons : le garage, le bûcher. Au sud, une façade vitrée devant une paroi lourde, un mur Trombe. »⁶⁷

Les espaces tampons représente un jeu entre l'organisation des pièces, leurs usages et les échanges thermiques entre intérieur et extérieur.

La conception architecturale bioclimatique a donc pour but d'intégrer ces solutions passives dans le processus. L'ensemble de ces solutions sont liées entre elles. Gunn, le décrit bien pour une maison en pierre dans son ouvrage *Stone House Construction* (bien que le nord et le sud soient inversé) :

« Dans les climats plus froids, l'épaisseur des murs peut à elle seule fournir suffisamment d'ombrage au-dessus des ouvertures vitrées. Les fenêtres orientées à l'est et à l'ouest doivent être réduites au minimum. Les fenêtres orientées au sud doivent fournir un éclairage et une ventilation adéquats. [...] En été, en particulier dans les climats où les journées chaudes sont suivies de nuits fraîches, les murs se refroidissent la nuit (grâce à la ventilation transversale) et restent frais pendant la majeure partie de la journée, absorbant la chaleur de l'air et de nos corps. Même lorsque la température de l'air est élevée, la maison reste confortable grâce aux murs en pierre. Un bon équilibre entre le gain solaire à travers le verre, la masse thermique et l'isolation peut réduire considérablement les besoins en chauffage et en climatisation. »⁶⁸

Les solutions passives s'intègrent donc le processus de conception réalisé par l'architecte dans le but de produire une maison bioclimatique, utilisant les énergies naturelles au lieu des énergies produites par l'être humain.

⁶⁶ Gilles Perraudin. Dijon : Les presses du réel. Collection architecture. ISBN 978-2-84066-416-1. p.114.

⁶⁷ Ibid.

⁶⁸ Traduit de : "In colder climates, the wall thickness alone may give enough shading over glazed openings. Windows on the east and west should be minimal. Windows on the south should provide adequate light and ventilation. [...] In summer, especially in a climate with hot days followed by cool nights, the walls cool down

at night (with the help of cross-ventilation), and stay cool during most of the day, absorbing heat from the air and from our bodies. Even with a hot air temperature the house feels comfortable because of the stone walls. The right balance of solar gain through glass, thermal mass and insulation can substantially reduce heating and cooling requirements." Dans : GUNN, Sarah, 2012. *Stone House Construction*. Australia : CSIRO. p.6

3.2_ Les transferts hygrothermiques dans une paroi en pierre naturelle

3.2.1_ La pierre naturelle en France

La pierre est un des matériaux de construction les plus anciens. Le but n'est pas de présenter l'entièreté des connaissances existantes sur la construction en pierre mais plutôt d'introduire les principales caractéristiques du matériau, et ce, selon les différents types de pierres.

3.2.1.1_ Les différents types de pierres

Premièrement, il convient de définir ce qu'est la pierre comme on l'entend quand on en parle comme matériau de construction. La pierre représente un bloc ou une masse extrait d'un type de roche pouvant alors être manipulé.

« Le terme « roche » désigne tout matériau naturel formé d'un assemblage de minéraux. Certaines

roches sont cohérentes et plus ou moins dures (à l'exemple des calcaires ou des granites), tandis que d'autres sont plastiques (argiles notamment) ou encore meubles (sables par exemple). Le terme « pierre » désigne quant à lui tout fragment de roche. »⁶⁹

Dans leurs rapports publiés en 2014, la BRGM présente alors les trois types de roches en proposant une définition concise pour chacune d'entre elles :

Les roches magmatiques résultent du refroidissement et de la solidification de magmas ; elles sont qualifiées de roches volcaniques (ou effusives) si elles proviennent d'éruptions volcaniques à la surface de la terre, ou de roches plutoniques (ou intrusives) si elles ont cristallisé et refroidi en profondeur ; parmi les principaux types de roches volcaniques, on peut citer les basaltes, trachytes, rhyolites et andésites, et parmi les types de roches plutoniques, les granites, syénites, diorites et gabbros.

Les roches sédimentaires naissent au fond d'une mer, sur la côte, ou plus rarement, à la surface d'un

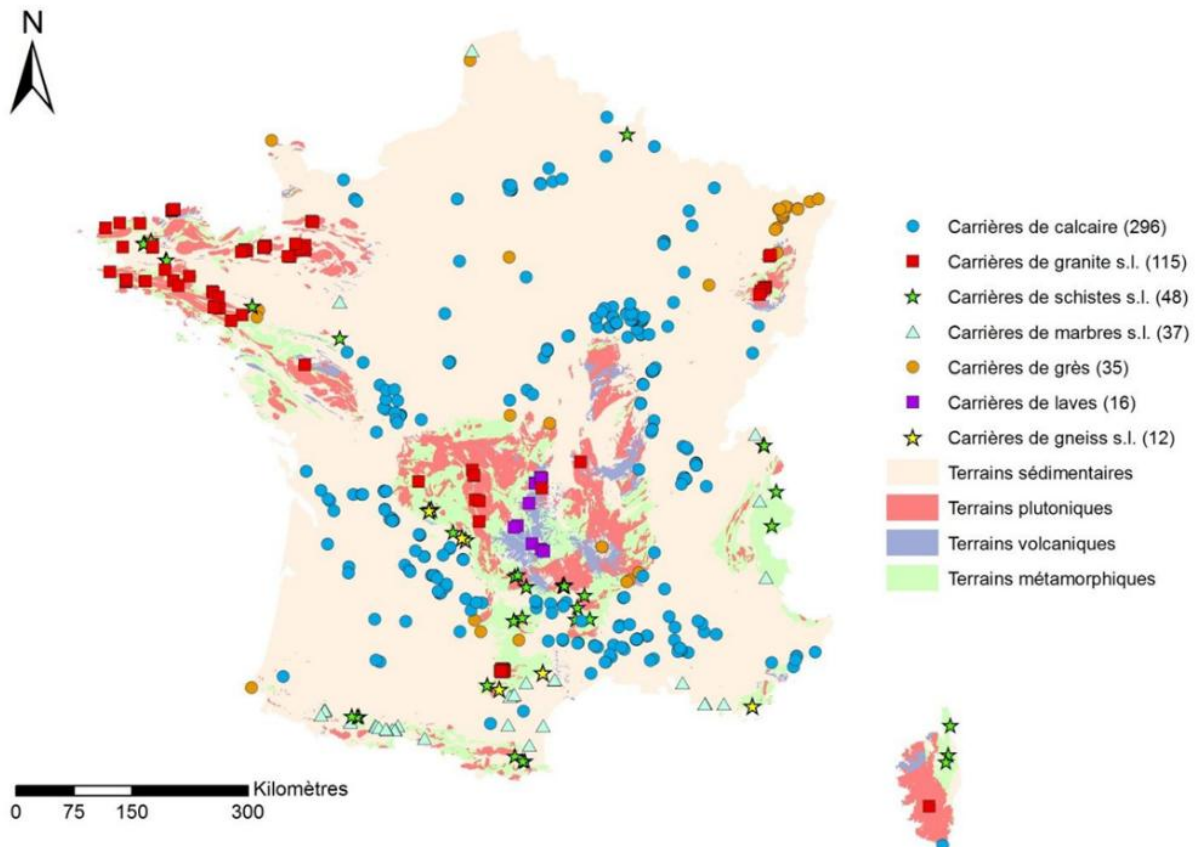


Figure 34 : Carte géologique simplifiée de la France par nature géologique de terrain avec superposition des 559 carrières fournissant des ROC (Source : BRGM, 2014)

⁶⁹ BRGM, 2014. Mémento sur l'industrie française des roches ornementales & de construction. p. 9.

continent ; elles sont issues de l'accumulation et du compactage de débris d'origine minérale (dégradation d'autres roches) et / ou organique (restes de végétaux et d'animaux), et / ou de précipitation chimique. On parle de roches carbonatées, si elles contiennent au moins 50 % de carbonates (calcite, dolomite, aragonite), et plus précisément de calcaires si ce carbonate est de la calcite ; on parle de roches détritiques, si elles contiennent au moins 50 % de débris issus de l'érosion d'autres roches à la surface d'un continent et/ou de squelettes et coquilles d'organismes vivants. Les principaux types de roches sédimentaires sont les calcaires et les grès.

Les roches métamorphiques sont issues de roches préexistantes (magmatiques, sédimentaires ou déjà métamorphisées) ayant subi des recristallisations dues à des élévations de température et / ou de pression ; les principales roches métamorphiques sont les gneiss, les schistes, les quartzites et les marbres, au strict sens géologique de chacun de ces termes.⁷⁰

De nombreuses carrières de pierres sont présentes en France car la présence de roches d'ornementation et de construction (ROC) englobe la majorité du territoire national (Figure 34). L'approche géologique présentée fait référence à la formation des pierres. « L'industrie française des roches ornementales et de construction distingue classiquement 6 secteurs d'activités d'extraction, de sciage et de transformation, correspondant chacun à une catégorie définie de pierres. »⁷¹. Les 6 catégories sont alors les suivantes, les pierres calcaires, les marbres, les granits & roches similaires, les grès de construction, les laves et ardoises. Seront alors présentées plus en détail uniquement les pierres qui feront l'objet d'une étude dans ce mémoire.

Les pierres calcaires font alors référence aux roches sédimentaires carbonatés comportant plus de 50% de calcite. Elles sont les pierres les plus utilisées dans la construction en France (52,7% des extractions⁷²) et représentent un cercle diversifié de pierres aux différentes caractéristiques. Lorsque l'on parle de pierre massive cela représente principalement de la pierre calcaire.

Les grès de construction sont aussi des pierres sédimentaires mais formées par l'alliance entre un sable et un ciment naturel. Ils sont généralement utilisés dans la construction comme pierre de taille ou encore en moellons.

Les laves sont quant à elles des roches magmatiques formées par le refroidissement des coulées volcaniques et utilisées en pierre de taille ou en moellons. Lave est le nom utilisé dans la profession

et ne fait pas référence un type géologique de roche en particulier.

3.2.1.2_ Caractéristiques générales

Pour l'ensemble des pierres utilisées, il sera plusieurs fois utilisé les mots tendres, fermes et dures permettant de classer la résistance mécanique en compression des pierres naturelles. Les pierres naturelles tendres ont une résistance inférieure à 10MPa, les pierres fermes ont une résistance comprise entre 10 et 40MPa et enfin celle des pierres dures est alors supérieure à 40MPa (selon NF DTU 20.1.).

Ce qui produit cette force et cette résistance c'est la longue période de formation des roches qui se font dans des environnements aux conditions variables et parfois extrême. La production de ce matériau le soumet donc à d'importantes différences de niveau de température, d'humidité, de pression, etc. Ce qui en fait sa résistance naturelle aux éléments naturels une fois extraite. Un matériau produit naturellement qui vient en cohésion avec son environnement. La pierre présente donc des propriétés intéressantes pour la construction.

La construction en pierre en France

Cette présentation du matériau permet alors de comprendre les futurs propos dans ce mémoire.

L'architecture en pierre s'est légèrement effacée au lendemain de la première guerre mondiale. La demande urgente de construction a mené à l'industrialisation du processus constructif au profit alors du béton qui deviendra le béton armé que l'on connaît aujourd'hui. L'utilisation réduite de la pierre, réduit le nombre de carrière et la pierre devient alors par oubli un matériau coûteux du fait de cette rarissime utilisation. Néanmoins, ce matériau n'a cessé d'exister et ce grâce à l'existence notamment de deux architectes et leur vision qui se sont succéder afin de faire 'renaître' la construction en pierre dans monde moderne. Fernand Pouillon prouve alors en 1955 avec la réalisation d'un projet de grande ampleur alors amorcé par la ville d'Aix-en-Provence et soutenu par le ministère de la Reconstruction. Construire 200 logements en 200 jours pour 200 millions de francs. En effet, ce projet fut réalisé en pierre de taille sans l'utilisation d'isolant.

⁷⁰ Ibid, p.10.

⁷¹ Ibid

⁷² Ibid. p.69.

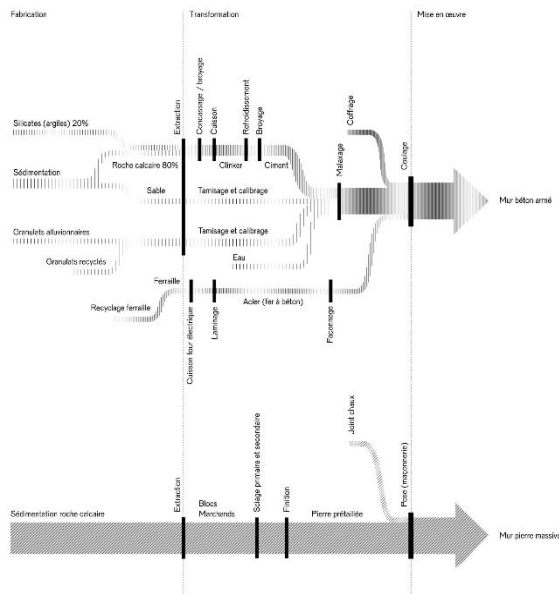


Figure 35 : Étapes de formation du béton et de la pierre jusqu'à la mise en œuvre (Source : Pierre, Révéler la ressource, Explorer le matériau, exposition présentée en 2018 au Pavillon de l'Arsenal)

« Nulle part l'architecture de la pierre n'a disposé d'un plus beau domaine et n'en a mieux tiré parti qu'autour de la Méditerranée. »⁷³

L'architecture en pierre s'est alors développée récemment et ce depuis les années 2000. Cette hausse est notamment due à la mécanisation du système d'extraction et de découpe des roches qui autrefois prenaient bien plus de temps. Cette mécanisation permet alors de rendre plus efficace la fabrication et la transformation du matériau (Figure 35). Cette efficacité traduit par ailleurs une empreinte carbone réduite ainsi qu'une mise en œuvre rapide et parfois à sec.

La pierre en France s'est développée dans les années 2000 et ce grâce à des acteurs impliqués dans l'évolution des connaissances en lançant des projets de recherche, en organisant des colloques, exposition et discussions ainsi qu'en fournissant des bases de données ouvertes publiquement.

3.2.1.3_ Projets et acteurs nationaux

Les acteurs majeurs dans le domaine de la recherche et la création de données sont :

- Le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CMTNC).
- Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).
- Le Syndicat National des Industries de Roches Ornamentales et de Construction (SNROC).

Un récapitulatif de la situation réalisée par la BRGM en 2014⁷⁴ créer la base d'une augmentation de la recherche dans le domaine de la construction en pierre en France. Les Colloques et expositions se sont multipliés jusqu'à atteindre un rythme annuel de nos jours.

En Janvier 2020 s'est tenu le colloque : *Construire en pierre aujourd'hui*, animé par des architectes contemporains à l'école d'architecture de Belleville.

En Juin 2024 s'est tenu le colloque : *La pierre, un choix sociétal*, au Pavillon de l'Arsenal. Sur une journée, de nombreux acteurs en lien avec la pierre ont présentés leurs avancées dans leurs domaines et des discussions ont eu lieu tout au long de la journée sur de nombreux domaines.

Des expositions comme celle au Pavillon de l'Arsenal, *Pierre, Révéler la ressource, Explorer le matériau*, en 2018, ou encore le *Salon de la pierre naturelle* à Londres en Juin 2025. Rocalia organise aussi des salons de la pierre dont un qui s'est tenu en décembre 2025 à Lyon.

De plus, lancé en 2019, le projet d'Optimisation Énergétique de l'Habitat Méditerranéen (OEHM)⁷⁵ vise à travers des recherches poussées suivant 4 axes majeurs à trouver des solutions architecturales et constructives concrètes.

« Avec de la pierre naturelle comme référence expérimentale, le modèle et le logiciel sont ainsi bien adaptés au matériau. Le CMTNC a contribué au projet en apportant son expertise sur les propriétés hygrothermiques de la pierre ainsi que sur les transferts de chaleur et d'humidité dans les composants d'enveloppes de bâtiments, notamment par la capitalisation de la thèse menée de 2017 à 2021, intitulée « La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnemental de la construction, études des propriétés de transferts

⁷³ VIDAL DE LA BLACHE, Paul, 2015. Les matériaux de construction. In : Principes de géographie humaine : Publiés d'après les manuscrits de l'auteur par Emmanuel de Martonne. Lyon : ENS Éditions. Bibliothèque idéale des sciences sociales. p.14.

⁷⁴ BRGM, 2014. Mémento sur l'industrie française des roches ornamentales & de construction.

⁷⁵ Site officiel : <https://www.lmgc.univ-montp2.fr/perso/oehm/>

hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments. »⁷⁶.

Le financement et l'élaboration de cette thèse publiée récemment offre alors une base de données très précieuse quant aux propriétés hygrothermiques de la pierre ayant un impact majeur dans les transferts thermiques.

Un autre projet qui fut récemment rendu publique est la lithothèque du CMTNC qui vise à recenser l'ensemble des roches ornementales et de construction extraite aujourd'hui en France. Cette base de données est encore à compléter (le CMTNC invite les fournisseurs de roche à partager les données afin de développer cette base de données) et elle est disponible en ligne au lien suivant : <https://lithoscopectmnc.com/>.

Les projets de développement de la pierre en France ne s'arrêtent pas et s'étendent même aux logiciels.

« Le département Pierre Naturelle du CMTNC a intégré depuis fin 2021 le projet de recherche national DOLMEN (Développement d'Outils et de Logiciels pour la Maçonnerie Existante et Neuve). Ce projet regroupe un grand nombre d'acteurs : universités, laboratoires, bureaux d'études, collectivités, etc. »⁷⁷

Ce type de projet est très important et ce, surtout de nos jours, lorsque l'on sait que la conception architecturale se fait très majoritairement à travers des logiciels. Il démontre un intérêt important pour le matériau ainsi qu'un avancement de la conception en maçonnerie avec les méthodes contemporaines.

De nombreux autres projets voient le jour depuis 2020 et contribuent au développement de la construction en pierre en France.

⁷⁶ CMTNC, 2023. Blog de pierre : Lettre d'information du Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction. juillet 2023. Vol. n°23, p. 2.

⁷⁷ Ibid, p.7.

3.2.2_ La paroi, écran protecteur du monde extérieur

La paroi représente la séparation entre un intérieur et un extérieur. C'est un élément d'apparence simple de l'architecture mais qui relève d'une certaine complexité. L'évolution et l'industrialisation de l'architecture a changé notre perception actuelle de la paroi. Il est donc bon de rappeler son rôle et de décrire la façon dont elle doit être pensée et conçue.

3.2.2.1_ Le rôle de la paroi : fondements

La paroi d'un bâtiment n'est autre que l'écran entre l'intérieur et l'extérieur, une séparation matérielle et physique. Torban Dahl décrit dans son livre « *Climate and Architecture* » cet écran comme la limite entre le climat et le confort (Figure 36). La paroi d'un bâtiment n'est autre que cet écran.

Nous avons vu précédemment que le climat est propre à un lieu et est donc variable. Pour autant, la zone de confort de l'être humain est universelle. Même s'il est important de noter qu'il existe des différences entre les individus et les climats, selon le principe de zone de confort adaptative. Néanmoins, la standardisation de l'architecture a amené à la standardisation de la zone de confort. Cette dernière est définie dans la partie 3.1.1, à environ 22°C, 50% d'humidité relative (variable aussi) et deux changements d'air par heure.

*« Il est donc important de concevoir l'enveloppe du bâtiment de manière à permettre cette interaction avec l'utilisateur. Cette dynamique entre utilisation, contrôle et climat est courante dans l'architecture vernaculaire, mais elle a été négligée dans une grande partie de la pratique moderne. »*⁷⁸

C'est en parti cette industrialisation et standardisation qui a favorisé l'utilisation d'éléments mécaniques pour créer un climat artificiel à l'intérieur, totalement indépendant de l'extérieur.

Torben Dahl appelle à faire des « économies d'énergie à laisser le climat intérieur suivre le climat extérieur dans une plus large mesure que ce qui est déterminé par les normes et les méthodes de conception actuelles. »⁷⁹

Comme présenté précédemment, le climat est majoritairement défini par un taux d'humidité et une température. L'architecture se doit donc

d'utiliser les énergies naturelles et les solutions passives pour adapter la paroi dans le but de moduler le climat extérieur en confort adaptatif intérieur.

Représenté dans la Figure 37, les éléments du climat extérieur créent le cube du confort introduit par Torben Dahl dans ce même ouvrage. De ce fait, on comprend que le climat interagi avec notre écran (la paroi) et l'être humain. Au même titre que notre corps, nos bâtiments se doivent de réguler le climat extérieur et de s'adapter intelligemment aux conditions qui lui sont imposées.

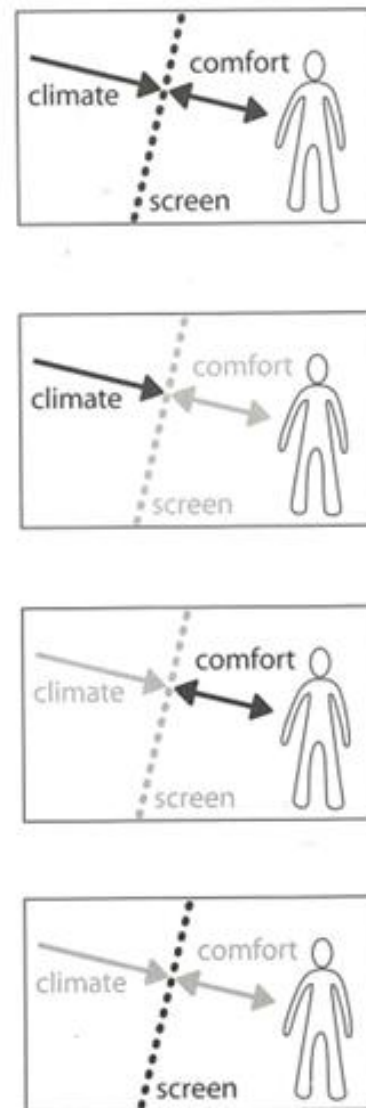


Figure 36 : L'écran climatique qui sépare entre l'intérieur et l'extérieur (Source : DAHL, 2010)

⁷⁸ Traduit de : " *It is therefore important to design the building envelope so as to enable this interaction with the user to occur. This dynamic between use, control and climate is common in vernacular architecture but has been neglected in much modern practice.* » dans : DAHL, Torben, et al., 2010. *Climate and architecture*. London, New York: Routledge. p.6.

⁷⁹ Traduit de : « [...] *energy savings in letting the indoor climate follow the outdoor climate to a greater extent than what is determined by current standards and design methods.* » dans : DAHL, Torben, et al., 2010. *Climate and architecture*. London, New York: Routledge. p.6.

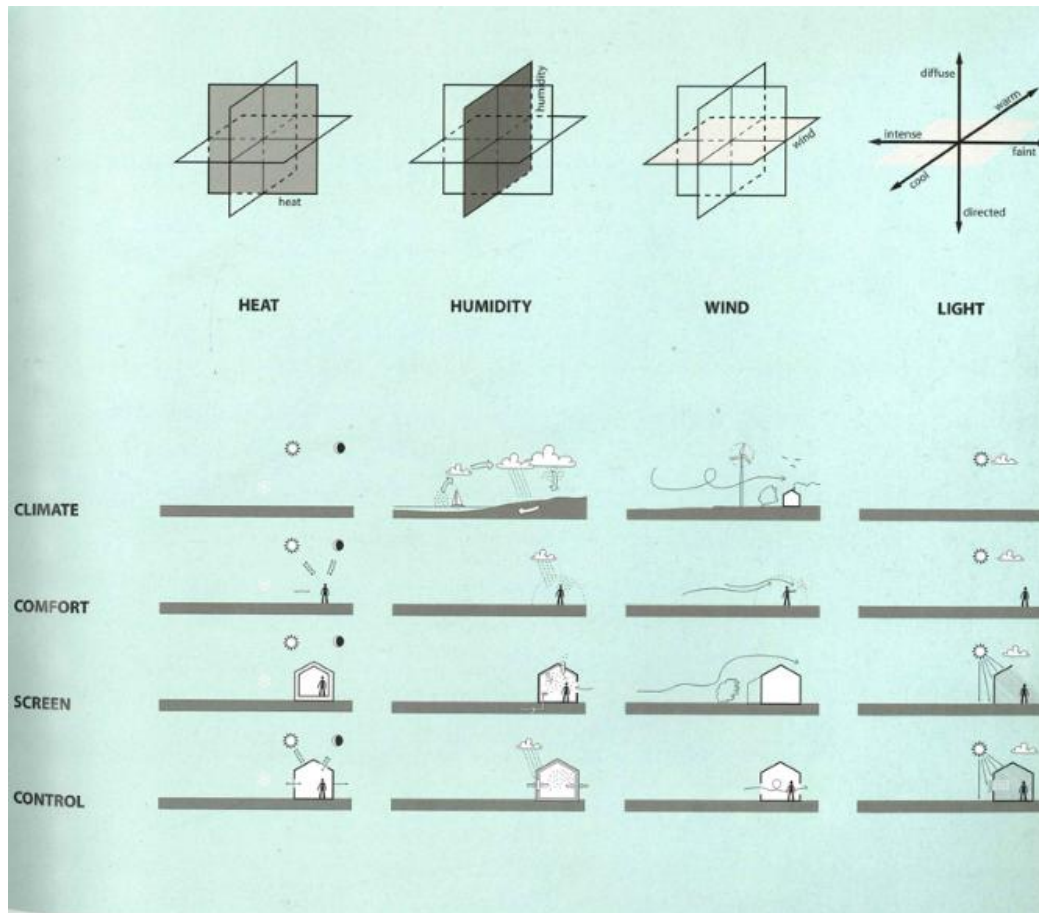


Figure 37 : Déconstruction du cube de confort en 4 sous-ensembles (Source : DAHL, 2010)

K-WAY OU PULL MERINOS ?

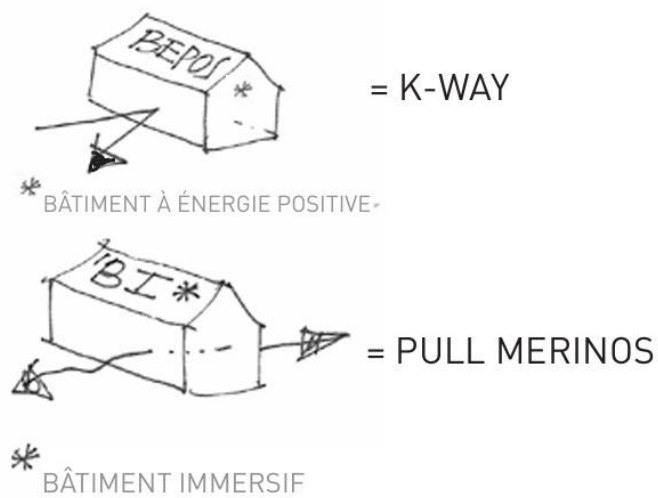


Figure 38 : Analogie avec le pull et le K- WAY (Source : Illustration de LM Ingénieur)

3.2.2.2_ Échanges entre intérieur et extérieur (théories)

Au même titre que les vêtements, la paroi est donc constituée de différentes couches selon la nécessité et chacun à son propre rôle. Selon le climat extérieur, nous nous habillons différemment, il en est de même pour la paroi d'un bâtiment.

Grégoire Mouly ingénieur en thermique du bâtiment lors du colloque, *La Pierre, un choix sociétal*, présente le bâtiment La Huchette (projet d'immeuble à Paris) par une comparaison simplifiée entre deux types de bâti (Figure 38).

« Le bâtiment de la Huchette est ainsi caractérisé par des murs en maçonnerie de moellons enduits, ce qui lui donne une forte inertie et une importante perméance à la vapeur d'eau. »

Cette illustration montre cette opposition entre le K-Way et le Pull Merinos (qui s'apparente ici au mur en maçonnerie de moellons). La comparaison est claire, le K-Way protège et sépare l'intérieur de l'extérieur en bloquant presque tout échange. Tandis que le pull merinos absorbe les différences de température et d'humidité, il adapte le climat extérieur. Et c'est ce que décrit Torben Dahl dans son livre, *l'industrialisation de la zone de confort et aussi liée à ce développement de l'étanchéisation de nos bâtiments*. Nous obligeant à utiliser des énergies fossiles pour recréer un climat à l'intérieur.

Il n'est pas question de choisir l'un ou l'autre, le K-Way à ses avantages dans certaines conditions. Mais la paroi d'un bâtiment ne se change pas au même titre qu'un vêtement. Elle doit donc répondre à différents besoins. Les dispositifs architecturaux doivent permettre de l'adapter en fonction des besoins des usagers.

Exprimé dans l'introduction, le développement technologique des matériaux de construction à mener à une spécification d'usage pour chacun de ces derniers. Le résultat est qu'aujourd'hui chaque couche d'une paroi à un usage bien défini (structurel, isolant, revêtement, etc).

L'opposition entre matériaux naturels et matériaux industriels se fait au même titre que l'opposition entre l'architecture vernaculaire et l'architecture moderne. Les deux s'opposent de plusieurs manières mais il existe des avantages à utiliser chacun d'entre eux. Les rénovations du bâti ancien

a par contre permis de comprendre que par exemple :

« La conséquence de l'imperméabilisation d'un mur est la création d'une barrière vis à vis de l'humidité. La vapeur est bloquée par ces matériaux et se condense, engendrant la présence d'eau liquide à l'intérieur du mur. »⁸⁰

Certaines techniques de rénovations visant donc à poser un enduit imperméable sur des murs en pierres menait à une retenue de l'humidité dans la paroi en pierre. Cette gestion des échanges d'humidité dans la paroi est très importante pour éviter tout conduction de l'eau dans une couche interne de la paroi.

« Le cas le plus souvent rencontré est celui lié à la mise en œuvre d'un enduit ciment sur les façades »⁸¹

« Cette barrière étanche engendre des surconsommations liées au taux d'humidité : Cette surconsommation est due à la surchauffe nécessaire à l'évacuation de l'excès d'humidité. Un taux d'humidité relative élevé augmente la sensation d'inconfort et peut inciter l'usager à augmenter la température de consigne. »⁸²

Les bâtis anciens ont majoritairement respirants et échanges de manière non régulée mécaniquement avec leurs environnement (fuite d'air par ouverture, déphasage et échanges thermiques, etc). Tandis que le bâti moderne se protège entièrement de l'extérieur et nécessite alors de réguler l'humidité et la ventilation autrement (Figure 42). L'architecture vernaculaire, réalisée par les populations utilisant les matériaux à leurs dispositions ont tout de même pensé la paroi. L'emploi d'enduit intérieurs et extérieurs, de revêtement et autre, permettait de créer différentes couches au sein de la paroi ayant leurs rôles. La maçonnerie est par exemple réalisée différemment selon la hauteur dans le mur, notamment pour gérer les échanges d'humidité (Cf. Annexe 5).

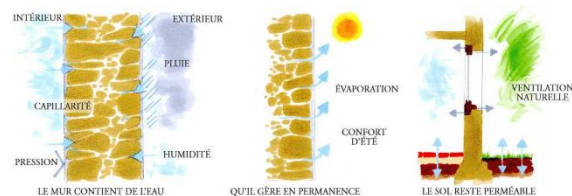


Figure 39 : Échanges d'humidité (Source : ATHEBA)

⁸⁰ Rénovation Thermique du bâti traditionnel Normand, 2013. Région Basse-Normandie. p.11

⁸¹ Rénovation Thermique du bâti traditionnel Normand, 2013. Région Basse-Normandie.

⁸² Ibid.

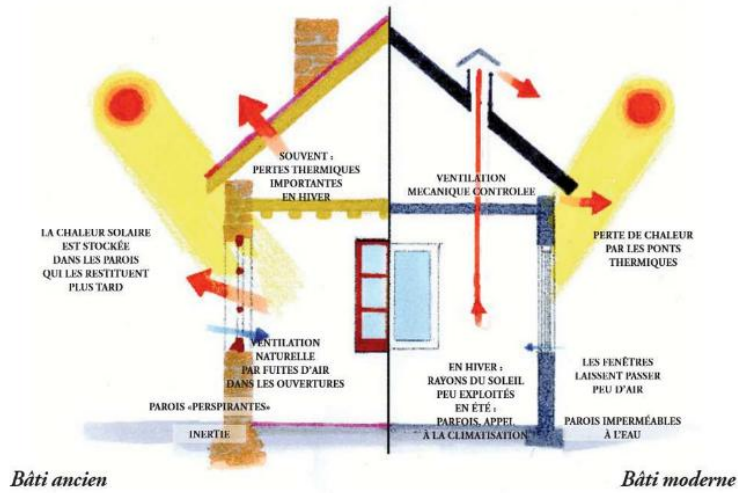


Figure 42 : Comparaison entre bâti ancien et bâti moderne (Source : ATHEBA)

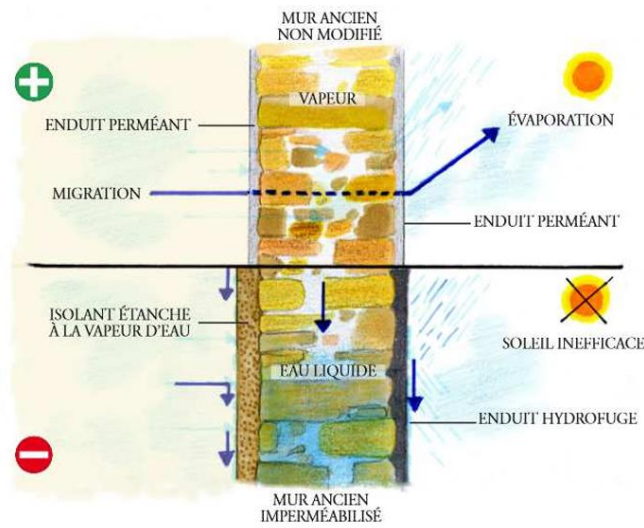
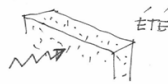
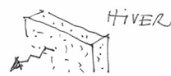


Figure 41 : Mur ancien en fonctionnement normal et après une mauvaise rénovation (Source : ATHEBA)

LE MUR BÉTON DE CHANVRE



L'évaporation de l'eau dans le mur absorbe la chaleur: maintien de la température du mur, sensation de fraîcheur.



La condensation de l'eau dans le mur dégage de la chaleur: maintien de la température du mur, sensation de chaleur.

LE PULL MERINOS



L'évaporation de l'eau dans le pull absorbe la chaleur: maintien de la température du corps, sensation de fraîcheur.



La condensation de l'eau dans le pull dégage de la chaleur: maintien de la température du corps, sensation de chaleur.

Figure 40 : Comparaison entre Béton de Chanvre et Laine de Merinos (Source : Illustration de LM Ingénieur)

3.2.2.2_ Calculs thermiques à l'échelle de la paroi (physique)

Chaleur : quantité d'énergie thermique transférée d'un corps à un autre. Variation d'énergie thermique d'un élément entre un état A et un état B.

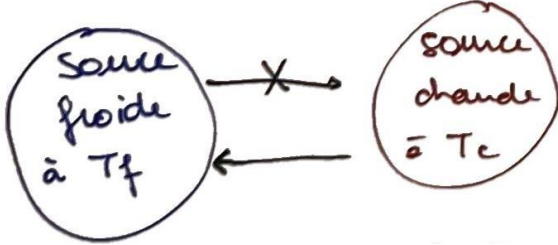


Figure 43 : Échange de chaleur entre deux sources (Source : Auteur)

$$Q = m \times c \times \Delta\theta$$

Avec :

m = Masse du corps considéré en [Kg]

$\Delta\theta$ = Différence de température entre deux états en [C] ou [K]

c = Capacité thermique massique en [J/kg C]

Une variation d'énergie (chaleur) se fait toujours d'une source chaude à une source froide.

Les échanges thermiques se font selon trois modes :

- 1) Conduction
- 2) Convection
- 3) Rayonnement

Les flux dans les transferts thermiques à l'échelle du bâti sont donc composés. La conduction reste le flux le plus important et est celui que l'on rencontre le plus lorsque l'on caractérise les matériaux.

Les flux thermiques de conduction dépendent des éléments suivants :

- Conductivité du matériau [λ]
- Surface de contact [S]
- Épaisseur des matériaux [e]

$$R_{\text{cond}} = \frac{e}{\lambda}$$

Avec :

R_{cond} = Résistance au transfert thermique par conduction en [$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$]

λ = Conductivité thermique du matériau en [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]

e = Épaisseur du matériau en [m]

Flux thermique de conduction :

On parle donc de résistance au transfert thermique, traduisant un pouvoir isolant. L'inverse de cette valeur équivaut à U , conductivité thermique d'une paroi. Plus la valeur R est élevée, plus la valeur U est faible, plus la paroi est considérée comme isolante. Une valeur bonne valeur de R se situe au-dessus de 5 [unité]. Les valeurs pour ces échanges par conduction dépendent uniquement des caractéristiques thermiques des matériaux employés dans la paroi.

R_i et R_e seront présentés juste après avec les transferts par convection, ils résultent d'un flux de convection au contact des deux surfaces d'une paroi.

$$R_{\text{cond,total}} = \sum R_{\text{cond},i}$$

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + R_{\text{cond,total}}}$$

Avec :

$R_{\text{cond,total}}$ = Résistance au transfert thermique par conduction de la paroi en [$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$]

R_i = Résistance au transfert thermique par convection à l'intérieur en [$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$]

R_e = Résistance au transfert thermique par convection à l'extérieur en [$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$]

U = Coefficient de conductivité thermique de la paroi en [$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$]

Flux thermiques de convection :

Le transfert thermique par convection se fait au sein d'un fluide en mouvement (air notamment). Cet échange dépend donc notamment des caractéristiques du fluide, dont sa vitesse de mouvement. On retrouve donc les échanges de convection entre la paroi et l'air (intérieur et extérieur) comme présenté dans la Figure 45. Les valeurs pour ces échanges sont prédéfinies dans le bâtiment (Figure 47).

$$\phi_{\text{conv}} = \frac{1}{R_{\text{conv}} \times S \times (\Delta T)}$$

Avec :

ϕ_{conv} = Flux thermique par convection en [W]

R_{conv} = Résistance de convection en [$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$]

S = Surface de contact en [m^2]

(ΔT) = Différence de température entre fluide et surface en [$^\circ\text{C}$]

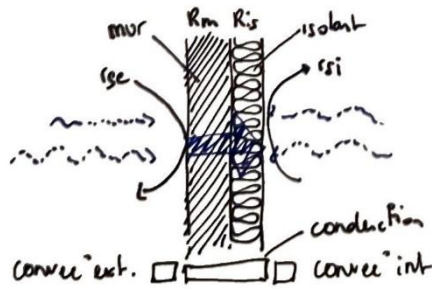


Figure 45 : Convection au niveau de la paroi (Source : Auteur)

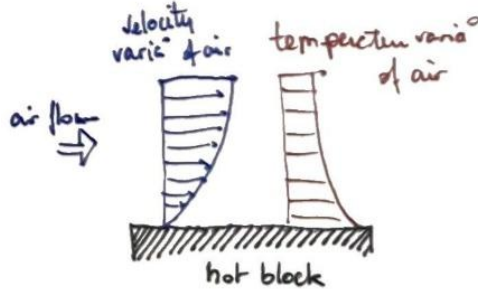


Figure 44 : Mouvement et température de l'air au contact d'une paroi (Source : Auteur)

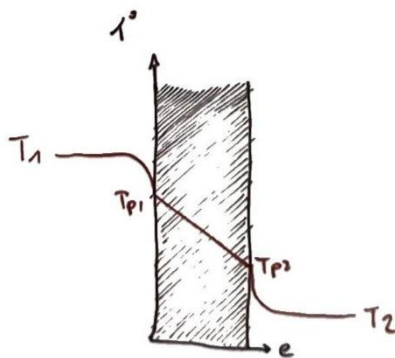


Figure 46 : Évolution de la température au niveau de la paroi (Source : Auteur)

Coefficient et résistance transmission thermique convection				
	Hi [W/m ² .°C]	He [W/m ² .°C]	Rsi = 1/Hi [m ² .°C/W]	Rse = 1/He [m ² .°C/W]
Paroi Verticale Flux horizontal	8	25	0.13	≈0 (Négligeable)
Paroi Horizontale Flux ascendant	10	25	0.10	≈0 (Négligeable)
Paroi Horizontale Flux descendant	6	25	0.17	≈0 (Négligeable)

Figure 47 : Valeurs des coefficients et résistance de transmission thermique par convection dans le bâtiment (Source : Cours de Thermique, Clément Trouche)

Flux thermiques de rayonnement :

Les échanges thermiques par rayonnement dépendent majoritairement de l'émissivité [unité] du matériau et de la différence de température entre les deux surfaces (Figure 48). Le transfert se fait par rayonnement d'ondes. Si un corps à une forte émissivité il va absorber le rayonnement, contrairement à un corps ayant une faible émissivité qui va réfléchir le rayonnement. Le corps à forte émissivité va absorber le rayonnement électromagnétique pour le transformer en énergie thermique.

$$H_r = 4 \times \epsilon \times \sigma \times T_m^3$$

Avec :

H_r = Coefficient de rayonnement thermique en [W/m².°C]

ϵ = Emissivité du matériau $0 < \epsilon < 1$ [Sans unité]

σ = Constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 \times 10^{-8}$ [W/m².°C⁴]

T_m = Température moyenne entre les deux corps concernés en [°C] $T_m = \frac{(T_1 + T_2)}{2}$

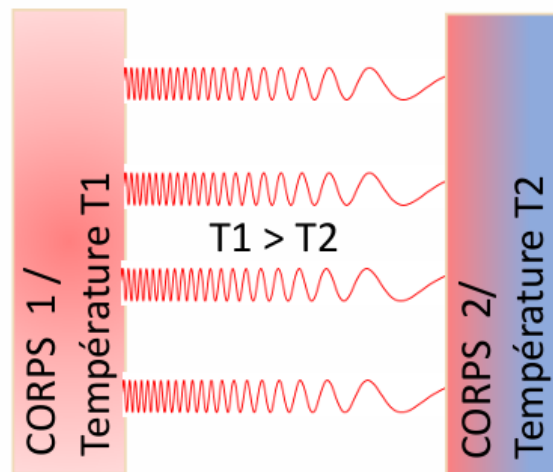


Figure 48: Échange par rayonnements thermiques (Source : Cours de Thermique, Clément Trouche)

Par ailleurs, la majorité des déperditions thermiques à l'échelle d'un bâtiment ne se fait pas par les parois. On les ressent généralement selon cette répartition :

- 30% : Toitures
- 20% : Murs
- 20% : Renouvellement d'air
- 15% : Fenêtres
- 10% : Planchers bas
- 5% : Ponts thermiques

Cependant, les déperditions sont très dépendantes de la conception du projet, tant par sa forme que par les matériaux employés.

3.2.2.3_ Paroi et confort thermique

Basé sur la notion de confort thermique, le ressenti dépend d'un bon nombre de choses.

La zone de confort de l'être humain présenté précédemment prends donc en compte la température de l'air ambiant ainsi que son taux d'humidité relative.

$$T_{\text{ressentie}} [^{\circ}\text{C}] = \frac{T_{\text{air}} + T_{\text{paroi}}}{2}$$

La température ressentie par une personne est la moyenne de la température de l'air ambiant et la température des parois environnantes.

Si la température de ressenti est inférieure à la température de l'air et trop basse, elle crée donc une situation d'inconfort. Ce phénomène est appelé, phénomène de paroi froide (Figure 49).

Malgré que la majorité des échanges thermiques entre le bâti et son environnement se font par conduction, les échanges entre l'homme et son environnement se font par convection et par rayonnement (Figure 52). La vitesse de mouvement de l'air et le rayonnement solaire (ou donc des parois) affectent le plus notre ressenti global. La température de la paroi fonctionnant donc par rayonnement nous importe énormément dans la température de ressenti, qui reste indépendant de la température de l'air ambiant. Cette sensation de paroi froide implique généralement un besoin de haussement de la température de l'air afin d'augmenter la température de ressenti, poussant donc à la surconsommation de chauffage. Bien sûr, cette température de la paroi dépend aussi de la surface de vitrage, de son exposition, et de plein d'autres facteurs.

La question de la paroi froide constitue un enjeu central dans l'analyse du confort thermique et de la consommation énergétique des bâtiments. Elle met en évidence le rôle déterminant de la température de surface des parois dans la perception du confort par les occupants, indépendamment de la seule température de l'air. C'est exactement ce que met en avant la Région Normandie dans son rapport sur la rénovation du bâti traditionnel :

« La sensation de paroi froide est un facteur très important lorsque l'on aborde le thème du confort et de la consommation énergétique. [...] Des murs, des sols ou des fenêtres mal isolés peuvent atteindre des températures de surface très faibles et produire un

rayonnement désagréable qui pousse les occupants à augmenter les températures de consigne pour améliorer le ressenti de confort. Il en résulte une surconsommation énergétique. L'orientation des murs influent sur leur température et donc sur ce phénomène de paroi froide. [...] Jadis, les lambris en bois, les tentures, et tapisseries posées sur les parois contribuaient à lutter contre ce phénomène de parois froides. Si une isolation du sol est techniquement impossible ou trop onéreuse, il est possible de limiter l'effet de paroi froide en choisissant des matériaux ayant une faible effusivité (tapis, parquets de bois...). Cette technique est également envisageable sur les murs, exemple : enduit sur mur de pierre. »⁸³

En effet, les enduits intérieurs peuvent aider à « supprimer la sensation de paroi froide en mettant un enduit isolant de type chaux/chanvre sur 5 à 8 cm. Il ne s'agit alors pas d'isolation mais de correction thermique »⁸⁴. De plus, ces enduits permettent une régulation de l'humidité intérieure permettant un meilleur confort pour les usagers à l'intérieur.

Par ailleurs, le choix du type de pierre a aussi un rôle à jouer dans ce phénomène selon leurs propriétés comme le montre la Figure 50.

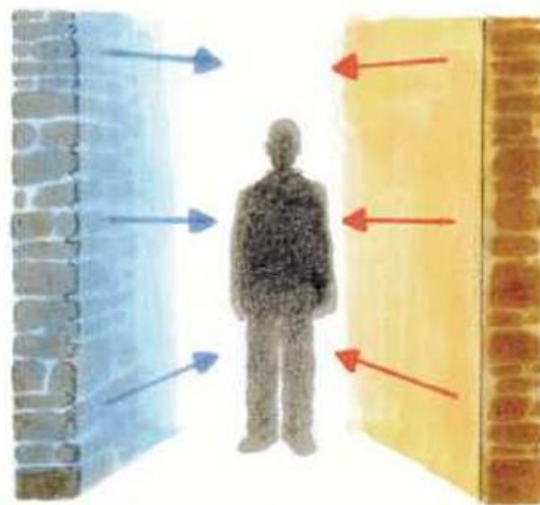


Figure 49 : Ressenti selon la température de la paroi (Source : ATHEBA)

Matériaux	Granit	Grès	Schiste	Calcaire tendre	Brique pleine
Densité (Kg/m3)	2600	2600	2400	1600	1850
Diffusivité $a(m^2/s) \times 10^{-6}$	1.1	0.8	0.9	0.6	0.6
Effusivité (J/Km ² ·v·s)	2698	2445	2298	2060	1265
Capacité thermique (KJ/m ² ·K)	1560	1560	1440	960	555
Inertie	forte	forte	forte	modérée	modérée
Phénomène de paroi froide	important	important	important	modéré	modéré

Figure 50 : Inertie et déphasage des différents type de pierres (Source : Région Basse-Normandie, 2013)

⁸³ Rénovation Thermique du bâti traditionnel Normand, 2013. Région Basse-Normandie. p.16

⁸⁴ Ibid

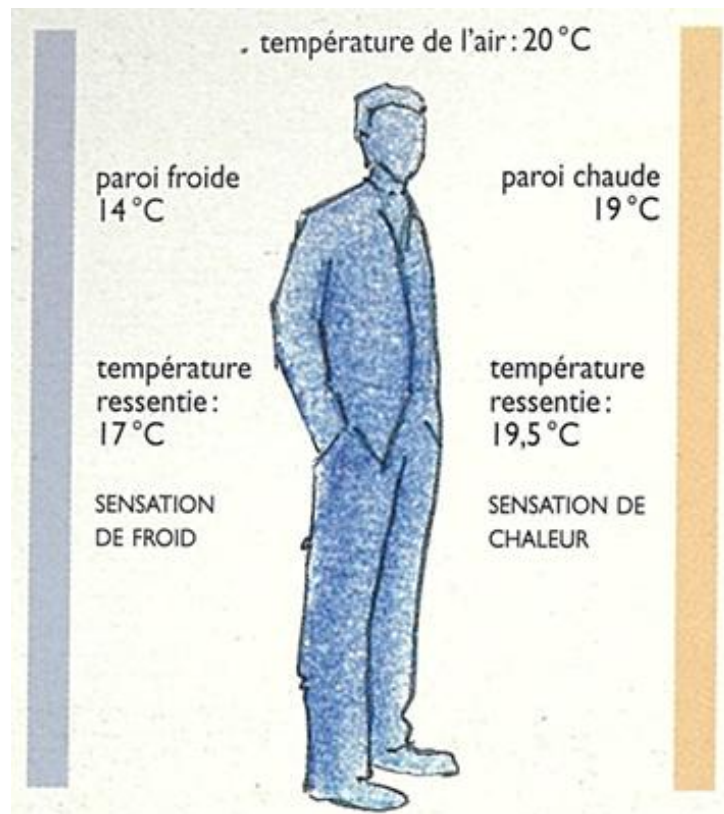


Figure 51 : Exemple de sensation de paroi froide
(Source : COURGEY et OLIVA, 2008)

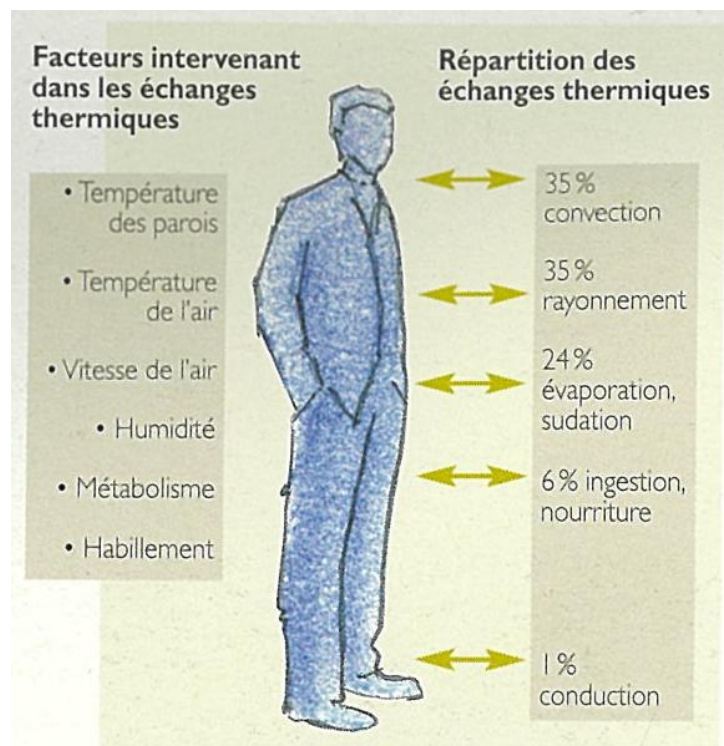


Figure 52 : Échanges thermiques entre l'homme et son environnement
(Source : COURGEY et OLIVA, 2008)

3.2.3_ La Pierre : un matériau naturel et complexe

La pierre, présentée précédemment d'un point de vue géologique, est un matériau naturel et complexe du fait de son processus de formation. Il existe donc différents types de pierres aux propriétés particulières. Ces différences selon des caractères physiques et chimiques bien précis et seront rapidement présentés dans cette partie afin d'assurer une bonne compréhension des simulations réalisées par la suite.

Les recherches sur la pierre ont mené à la mesure de beaucoup de ses caractéristiques. Néanmoins, des recherches complémentaires sont toujours nécessaires et ce dû à la diversité des possibilités. Ces données sur les matériaux naturels sont nécessaires à la simulation afin de mesurer leurs performances (thermiques, hydriques, etc). Même si les ordres de grandeurs sont connus pour chaque type de roche, certains faibles changements peuvent induire des différences de performance sur une année entière et plus.

Nous allons donc présenter les éléments suivants :

- La porosité
- Les propriétés hydriques
- Les propriétés hygroscopiques
- Les propriétés thermiques

3.2.3.1_ La porosité

La porosité de la pierre est le ratio (en pourcents) de volume de l'espace poreux (vide) par le volume total.

« La porosité de la roche et de la pierre aide à déterminer la résistance et la durabilité, mais permet également d'estimer la teneur en humidité et le passage à travers la maçonnerie. Il est donc important de bien comprendre la taille et la nature de ces canaux. »⁸⁵

La porosité dépend énormément du type de roche et donc de la manière dont elle a été formée. Les roches magmatiques vont avoir de très petits pores pour une faible porosité. Il en est de même pour les roches métamorphiques. Pour les roches sédimentaires, les variations sont plus importantes mais les pores sont généralement plus importants qualifiés de mégapores et micropores⁸⁶. La porosité a un lien avec d'autres caractéristiques des pierres comme la résistance à la compression (Figure 53),

⁸⁵ Traduit de : « The porosity of rock and stone helps to determine the strength and durability, but also permits estimates of the content of moisture and travel through the masonry. A full understanding of the size and character of such channel ways is therefore important. » dans : WINKLER, Erhard M., 1997. Stone in Architecture: Properties, Durability. Third, Completely Revised and Extended Edition. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin / Heidelberg.

les transferts thermiques ou encore l'absorption de l'eau et de la vapeur d'eau. Ce paramètre influence donc ces paramètres et est donc très révélateur des autres caractéristiques. Un granit (roche magmatique) aura donc une très faible porosité et une grande résistance à la compression (du fait qu'elle soit majoritairement constituée de matière) mais possèdera une plus importante conductivité thermique de ce fait.

3.2.3.2_ Les propriétés hydriques

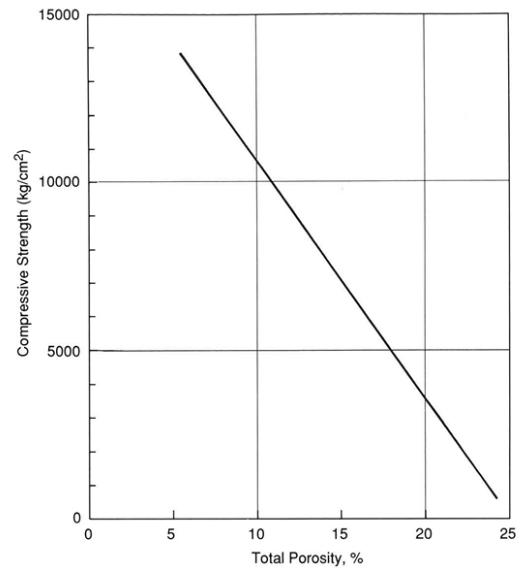


Figure 53 : Lien entre porosité et force de compression uniaxiale (Source : WINKLER, 1997)

La pierre étant un matériau poreux, possède une capacité de régulation hydrique au même titre qu'un sol. Les cavités d'air (pores) peuvent donc se remplir d'eau et se vider selon les conditions. Cette caractéristique est très importante car elle influence d'autres caractéristiques et offre à la pierre une caractéristique très intéressante. Précédemment nous avons évoqué le fait d'adapter le climat extérieur pour une zone de confort de l'être humain à l'intérieur. Les variations d'humidités à l'extérieur étant importantes en fonction de la journée et de la période de l'année, il est intéressant que la pierre possède cette capacité de régulation hydrique.

« L'eau peut passer de l'état de vapeur à celui de liquide puis de glace lorsqu'elle se déplace dans les pores d'une pierre. Elle peut s'évaporer, se condenser

Revised and Extended Edition. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin / Heidelberg.

⁸⁶ WINKLER, Erhard M., 1997. Stone in Architecture: Properties, Durability. Third, Completely Revised and Extended Edition. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin / Heidelberg. p.33.

ou se dilater en fonction de la température, de l'humidité relative, du rayonnement solaire et de la pression hydrostatique ou du vent. L'humidité de l'air peut se condenser sur la pierre froide lorsque la température baisse et être attirée dans la pierre poreuse par capillarité à travers les plus petits pores. »⁸⁷

Cette faculté de réguler l'humidité est primordial en architecture et surtout dans un climat tempéré et humide comme la majeure partie de la France. « [...], si la pierre est à la fois poreuse et perméable, elle absorbera et libérera rapidement l'humidité, limitant ainsi les dégâts causés par l'eau et les produits chimiques. »⁸⁸

La plupart des roches sédimentaires contiennent cette caractéristique les rendant intéressantes pour la construction, mais pas toutes. Les roches sédimentaires carbonatés sont les poreuses⁸⁹ (de par la présence de calcite ou dolomite). Cette propriété est donc très importante et influera les choix de roches étudiées par la suite. Puisque si ce niveau de porosité et de perméabilité est trop important, alors la pierre se confronte à des risques de détérioration, bien que la mise en œuvre permette de limiter cette altération.

Les échanges d'eau dans la pierre peuvent se faire sous plusieurs formes de l'eau. Les changements de phases de l'eau étant dans des températures faisant partie du rang de température observable à l'extérieur. L'eau peut changer d'état dans la pierre en fonction de sa température (pierre). L'humidité extérieure se dépose à l'intérieur par absorption ou

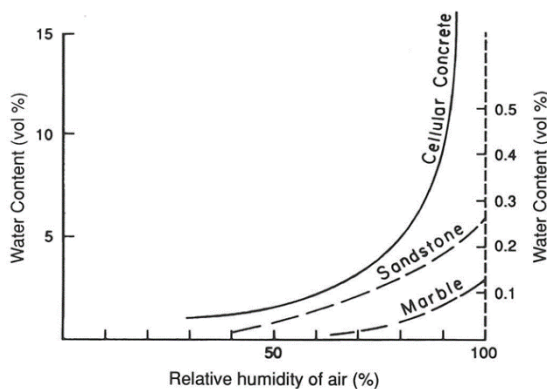


Figure 54 : Absorption de l'humidité en fonction de l'humidité relative (Source : WINKLER, 1997)

⁸⁷ Traduit de : « Water can change from vapor to liquid to ice as it moves through the pores of a stone. It can evaporate, condense, or expand in response to temperature, relative humidity, solar radiation, and hydrostatic or wind pressure. Moisture in the air can condense on cold stone as temperature drop and be drawn into porous stone through capillary action through the smallest of pores. » dans : PRANGER, Susan, 2024. Old Materials, New Climate : Traditional Building Materials in a Changing World. New York : Routledge.

aspiration (sourcer) et peut par la suite condenser et se transformer en eau liquide. L'humidité peut aussi arriver par l'infiltration de l'eau de pluie dans le mur ou même par remontées capillaires venant du sol.

L'humidité dans la pierre peut avoir différents impacts dont un, très important, sa dégradation. Les propriétés hydriques sont influencées par la porosité de la pierre en question. De plus, le rayonnement solaire et le vent permettent de réguler l'humidité de la pierre en faisant changer la température ou la pression de l'air autour et dans la pierre. Il est important d'ajouter que malgré une humidité stable à l'intérieur d'un bâtiment. Elle peut varier selon les pièces qu'on appelle pièces humides, la cuisine et la salle de bain. L'humidité produite à l'intérieur peut aussi s'infiltrer dans la pierre si ces pièces ne sont pas correctement ventilées. D'autres paramètres peuvent entrer en compte comme l'humidité à la mise en œuvre.

« En présence d'air, qui contient une proportion variable de vapeur d'eau, un matériau poreux va être le lieu d'échanges réversibles. Les cavités vont absorber ou relâcher de l'eau sous formes liquide et vapeur en fonction des sollicitations. Les forces motrices peuvent être les gradients de températures et de pression (pression du vent, gravité, pression capillaire, pression partielle). Selon l'état hydrique préalable du matériau, les phénomènes seront différents. »⁹⁰

La Figure 57 schématise donc ces transferts au sein de la pierre. La porosité d'une roche influe donc sur la taille et l'organisation des pores (Figure 58) et donc sa capacité et facilité à être saturée en eau. La mesure de cette caractéristique est faite par les isothermes de sorption et de désorption qui « traduisent le comportement hygroscopique des matériaux poreux en équilibre à des températures et humidités relatives constantes. Elles permettent de mettre en relation la teneur en eau avec l'humidité relative de l'air pour une température donnée. »⁹¹

Les propriétés hydriques de la pierre ont donc une importance capitale, de plus elles influent sur les propriétés thermiques.

⁸⁸ Traduit de : « [...], if the stone is both porous and permeable, the stone will both absorb and release moisture quickly, limiting damage from water and chemicals » dans : Ibid.

⁸⁹ Ibid, p.73.

⁹⁰ PESTRE, Tristan, 2021. La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments. Université d'Artois. p.90.

⁹¹ Ibid.

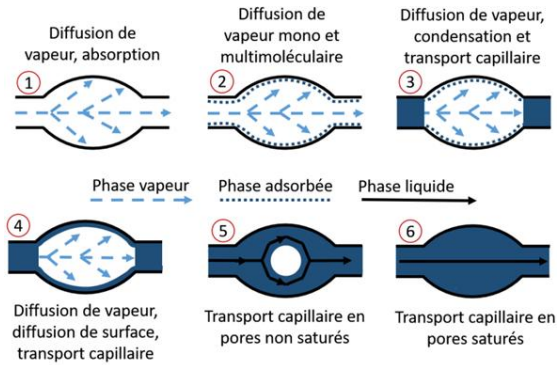


Figure 57 : Schéma du transport d'humidité dans les pores (Source : PESTRE, 2021)

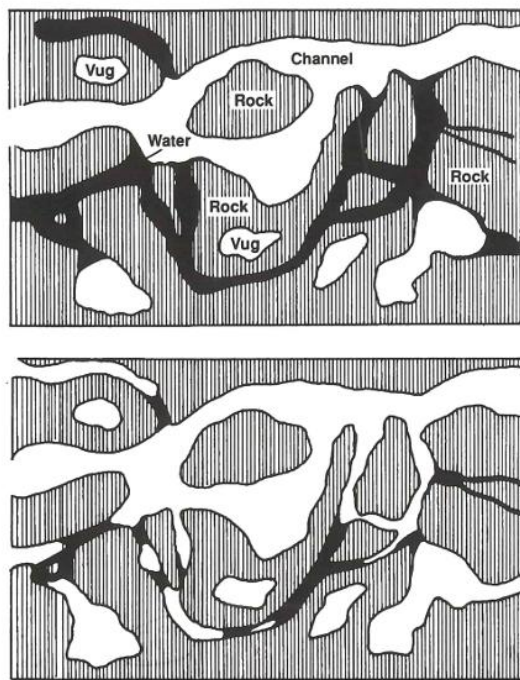


Figure 58 : Système hypothétique de pores dans les pierres poreuses, ici une roche dolomite, dessiné avec deux quantités d'eau différentes (Source : WINKLER, 1997)

	Densité ou masse volumique	Porosité	Capacité thermique	Conductivité thermique (sec)
	kg/m ³	%	J/kgK	W/mK
Granite	2600	1	1560	2,4
Grès	2600	15	1560	1,6
Schiste	2400	4	1440	1,9
Calcaire tendre	1600	25	960	0,92

Figure 55 : Résumé des principales caractéristiques des différentes pierres (Source : Réalisé par Auteur, données tirées de RBN, 2013)

	Paroi verticale non isolée : U-Value (dry) (W/m ² K)		Paroi verticale non isolée : R-Value (dry) (m ² K/W)	
	0,3	0,5	0,3	0,5
Épaisseur (m)	0,3	0,5	0,3	0,5
Granite	3,45	2,68	0,13	0,21
Grès	2,84	2,09	0,19	0,31
Schiste	3,10	2,34	0,16	0,26
Calcaire tendre	2,04	1,41	0,33	0,54

Figure 56 : Valeurs de U et de R pour des parois en pierre non isolées selon les types de pierre employés (Source : Auteur)

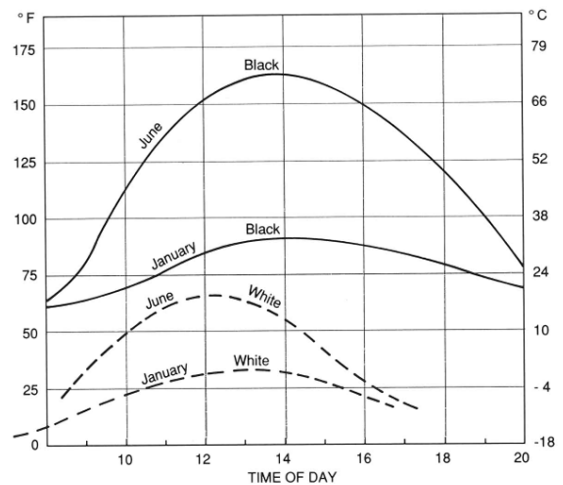


Figure 59 : Température de surface d'une surface de pierre blanche et noire à différentes heures d'un jour en Juin et Janvier, proche de Whashington (Source : WINKLER, 1997)

3.2.3.3_ Les propriétés thermiques

Dans *Stone House Construction*, mentionné plus tôt, GUNN écrit :

« Les gens disent souvent que les maisons en pierre sont froides. Mais ce n'est pas forcément le cas. »⁹²

En effet, la pierre n'est pas un bon isolant mais possède néanmoins des capacités de stockage de chaleur. Cette partie vise donc à présenter les propriétés thermiques de la pierre.

Les propriétés thermiques de la pierre sont mesurables selon les mêmes caractéristiques que d'autres matériaux (conductivité thermique, etc).

La conductivité thermique des différentes pierres que l'on trouve en France est présenté par la Figure 60, elle oscille entre 0,9 et 2,5 W/m°C.

Comme expliqué précédemment, on peut voir un lien clair entre porosité et conductivité thermique, plus une pierre est poreuse, moins elle est conductrice de chaleur.

La pierre ne possède donc pas un très bon coefficient de conductivité thermique, ni une très bonne résistance à la conductivité thermique. Il faudra alors avoir une paroi épaisse si l'on espère atteindre une valeur de U intéressante et se situant donc en dessous de ce qui est recommandé par la réglementation (Partie 3.3.3.1). Les valeurs de U et de R pour des parois en pierre non isolées sont présentées dans la Figure 56.

Néanmoins, elle possède d'autres propriétés en lien avec les échanges thermiques. Par exemple, la capacité thermique permet de calculer le transfert de chaleur total transféré d'un milieu à un autre. Plus la capacité thermique est élevée, plus la quantité de chaleur (énergie thermique) sera transmise.

De, plus comme présenté précédemment, le rayonnement peut faire que la paroi extérieure d'un mur en pierre (du moins celle exposé au rayonnement solaire), se réchauffe intensément. La pierre ayant une forte émissivité, présente aussi une forte absorption des rayonnements solaires.

Matériaux	Granite	Grès	Calcaire extra dur	Schiste	Calcaire tendre	Brique pleine
Conductivité thermique λ (W/mK)	2.4	1.6	2	1.9	0.92	0.8
Résistance thermique R(m ² k/W)						
40cm	0,17	0,25	0,2	0,21	0,43	0,5
60cm	0,25	0,38	0,3	0,32	0,65	0,75

Figure 60 : Conductivité et résistance à la conductivité des différentes pierres (Source : Région Basse-Normandie, 2013)

« La température des roches dans les déserts et sur les bâtiments en pierre peut atteindre 60 °C, voire plus sur les façades en pierre sombre. Les températures enregistrées sur des surfaces noires et blanches peuvent servir de base pour les températures de surface, par exemple une surface en « granit » noir et une surface en marbre blanc (Cullen 1963) »⁹³.

En effet, comme le présente la Figure 59, la couleur à une importance pour ce qui est de l'absorption du rayonnement solaire, et ce, pour n'importe quel matériau.

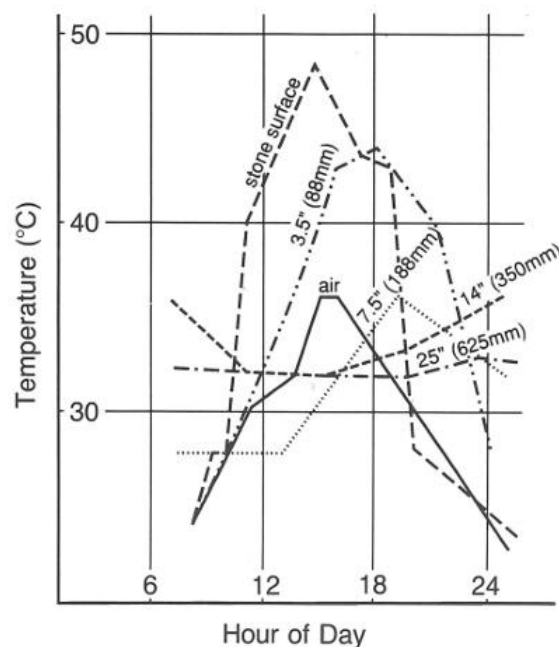
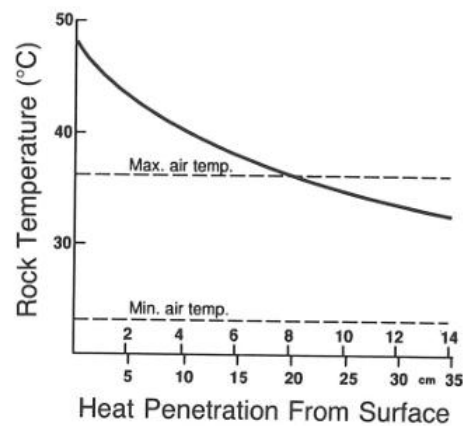


Figure 61 : Température d'une pierre en fonction de son épaisseur, puis comparaison sur une journée en relation avec la température de l'air extérieur (Source : WINKLER, 1997)

⁹² GUNN, Sarah, 2012. *Stone House Construction*. Australia : CSIRO.

⁹³ SIEGISMUND, Siegfried et SNETHLAGE, Rolf, 2011. *Stone in Architecture: Properties, Durability*. p.48.

La Figure 61, permet de comprendre l'impact de l'échauffement de cette surface extérieure d'une paroi en pierre, et de comment la chaleur pénètre en fonction de la profondeur du mur. Le graphique du dessous démontre l'évolution des températures de ces parois en fonction de l'épaisseur, en la comparant à la température de l'air extérieur. Cette caractéristique introduit la notion de déphasage thermique, propre à la pierre, qui consiste au temps de réponse pour qu'une température mesurée à l'extérieur soit transmise à l'intérieur (avec une déperdition).

Cette notion permet donc de lier température de surface extérieure et température de surface intérieure d'une paroi en pierre. La chaleur transmise par la pierre ne dépend pas alors uniquement de la température extérieure mais aussi de la température de la surface extérieure.

« Selon McGreevy (1985), les différentes températures de surface des pierres des bâtiments urbains de Belfast, en Irlande, dépendent de l'albédo, de la température maximale et de la conductivité thermique, qui sont étroitement corrélés. Les températures de surface maximales dépendent de la conductivité et de l'albédo. Les mesures prises à 5 cm sous la surface de la pierre dépendent fortement de la conductivité thermique. »⁹⁴

Comme expliqué par WINKLER, la transmission de cette température de surface dépend alors de la conductivité thermique de la pierre. Son propos est accompagné d'un tableau () montrant l'évolution de la température de la pierre selon l'épaisseur en lien avec l'albédo et la conductivité thermique. L'albédo représente la quantité de rayonnement solaire (en pourcentage) réfléchi par le matériau. La pierre montrée ici à un albédo plutôt faible montrant qu'elle absorbe le reste des rayonnements solaire. Cet albédo dépend donc du type de pierre et aussi plus généralement de sa couleur.

	Max. temperature		Albedo (%)	Thermal conductivity (W/m°C)
	Surface	5 cm below		
Chalk	24.2	23.6	25	1.72
Granite	27.4	25.8	18	1.65
Sandstone	28.5	26.5	12	1.05
Basalt	29.2	26.3	12	0.96

Figure 62 : Tableau de température de surface et de 5cm en profondeur selon différents types de pierre (Source : WINKLER, 1997)

3.2.3.4_ Inertie thermique, déphasage thermique et solution passive

Le rayonnement solaire agissant sur la paroi, échauffant la surface extérieure, cette chaleur, se transmet par conduction au sein de la paroi avant d'être transmise à la surface intérieure.

Le temps de réponse d'un mur en pierre dépend donc de sa capacité à transmettre la chaleur de la surface extérieure à la surface intérieure. Il dépend alors de l'épaisseur du mur et de la diffusivité de la pierre employée. La diffusivité dépend elle de la conductivité, de la densité et de la capacité thermique massique (correspondant à la quantité de chaleur que le matériau peut stocker en fonction de son poids). La capacité thermique, la conductivité et la densité variant pour chaque pierre, le temps de réponse est propre à chaque pierre pour une épaisseur donnée. Ce temps de réponse s'appelle le déphasage thermique et il se calcule ainsi :

$$D = \frac{e \times 1,38}{\sqrt{a}}$$

Avec :

D = Déphasage thermique en[h]

e = épaisseur de la paroi en[m]

a = Diffusivité

$$a = \frac{\lambda}{d \times C_m}$$

Avec :

a = Diffusivité

d = Densité en[kg/m³]

C_m = Capacité thermique massique du matériau en[Wh/kg.K]

λ = Conductivité thermique du matériau en[W/m.K]

Le déphasage et l'inertie thermique sont différents, l'inertie correspond à l'atténuation des variations de températures. Ceci se caractérise par la capacité du matériau à absorber la chaleur sans se réchauffer, défini par l'effusivité. L'inertie dépend principalement de la densité et décrit bien la capacité à stocker de l'énergie.

Pour les pierres présentes en France, on retrouve dans la Figure 64, les différentes caractéristiques

⁹⁴ Traduit de : "Different stone surface temperatures on buildings in urban Belfast, Ireland, according to McGreevy (1985) are a function of the albedo, the maximum temperature, and the thermal conductivity in close correlation with one another. The peak surface temperatures depend on the conductivity and on the

albedo. Measurements taken 5cm below the stone surface depend much on the thermal conductivity" dans : WINKLER, Erhard M., 1997. Stone in Architecture: Properties, Durability. Third, Completely Revised and Extended Edition. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin / Heidelberg. p.48-49.

induisant une forte inertie ou non. La Figure 63, montre le temps de réponse de différentes parois en fonction de la composition (épaisseur et matériau employé). La classification faite par la Région Basse-Normandie des différents modes constructifs permet alors de comprendre la relation entre ces modes constructifs et leurs classes d'inertie selon le type de paroi à réaliser.

L'usage de cette inertie thermique (« Thermal mass » en anglais) et du déphasage thermique, font évidemment référence à l'utilisation des solutions passives préalablement présentées (partie 3.1.3.2).

L'inertie peut en effet avoir lieu lorsque le rayonnement solaire et l'air ambiant créent un surplus de chaleur, pouvant être stocké dans la pierre sans pour autant la réchauffer. L'inertie importe énormément pour le confort d'été. Tandis que le déphasage permet principalement de différer l'arrivée de la chaleur extérieure à l'intérieur, durant la nuit lorsqu'elle est nécessaire ou que l'on peut ventiler pour faire évacuer le trop plein de chaleur.

De plus, l'inertie thermique fonctionne tout autant avec la chaleur produite par un feu de cheminée qui échauffera la surface de la paroi en pierre qui sera transmise plus tard selon le temps de réponse de la pierre en question. Cependant, la pierre doit être en contact avec la pièce intérieur pour que ces échanges aient lieu.

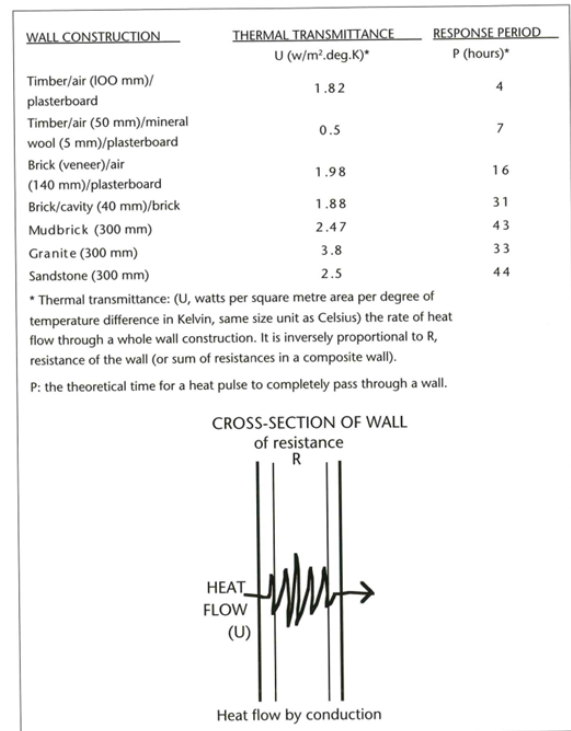


Figure 63 : Transferts thermiques par conduction pour différentes parois et temps de réponse (Source : GUNN, 2012)

Matériaux	Granit	Grès	Schiste	Calcaire tendre	Brique pleine
Densité (Kg/m3)	2600	2600	2400	1600	1850
Diffusivité a(m ² /s)x10 ⁻⁶	1.1	0.8	0.9	0.6	0.6
Effusivité (J/Km ² .v.s)	2698	2445	2298	2060	1265
Capacité thermique (KJ/m ² .K)	1560	1560	1440	960	555
Inertie	forte	forte	forte	modérée	modérée
Phénomène de paroi froide	important	important	important	modéré	modéré

Figure 64 : Inertie et déphasage des différents type de pierres (Source : Région Basse-Normandie, 2013)

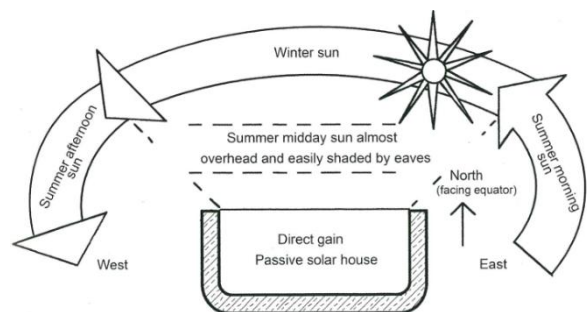


Figure 66 : Principe bioclimatique d'orientation d'une maison en Australie (Source : Stone GUNN, 2012)

Classe d'inertie quotidienne de la construction	Combinaisons possibles		
	Parois	Plancher bas	Plancher haut
Très lourde	Pierre Brique terre cuite Terre crue	Dalles de Pierre	Bois
		Bois sur hourdis ou sur voûte en briques	
Lourde	Pierre Brique terre cuite Terre crue	Bois	Bois
		Bois et torchis	
Moyenne	Bois et torchis	Dalles de Pierre	Bois
		Bois	

Figure 65 : Classes d'inerties selon les parois et matériaux (Source : Région Basse-Normandie, 2013)

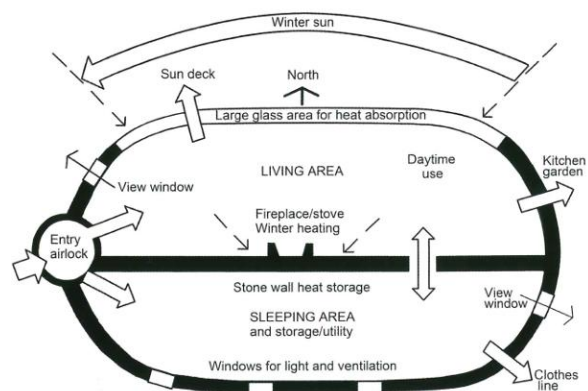


Figure 67 : Principaux échanges entre l'intérieur et l'extérieur pour une maison bioclimatique en Australie (Source : GUNN, 2012)

3.2.4_ Analyse hygrothermique des matériaux naturels

3.2.4.1_ Analyse thermique, hygrothermiques et dynamiques

Il existe différents types de simulations au niveau d'une paroi, les voici :

- Échanges de température
- Échanges de températures, d'humidités, du rayonnement solaire et du vent

Le premier type de simulation ne prenant en compte que les échanges de températures permettent de calculer les flux thermiques de conduction selon une température intérieure et une température extérieure fixe.

Le deuxième type de simulation permet de calculer les échanges de températures en prenant en compte des conditions plus proches de la réalité. En effet, cela permet de mesurer les changements de taux d'humidité à l'intérieur, l'impact de la paroi sur ce dernier et sa gestion du taux d'humidité interne. De plus, la pluie et le soleil sont pris en compte, permettant de simuler aux plus proches des conditions réelles les flux ayant lieu au sein d'une paroi et de ses deux surfaces.

Comme nous l'avons vu précédemment, le rayonnement solaire, la vitesse de mouvement de l'air au niveau de la paroi ou encore la pluie à un impact sur les flux thermiques et hydriques au sein du matériaux. Et surtout pour une paroi en pierre. En effet, la construction moderne visant à protéger l'isolant d'un bardage et d'un pare-pluie permet de bloquer ces éléments naturels extérieurs, donc un calcul de flux de température et de vérification de la condensation dans les différentes couches peut suffire. Néanmoins, construire en pierre en façade (donc exposée) nécessite des calculs thermiques plus poussés afin de réellement mesurer son comportement.

Dans la thèse réalisée par PESTRE, présentée en amont, il est évoqué ceci :

« La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité est amenée à se développer et nous pouvons imaginer que les échanges hydriques soient, à l'avenir, davantage pris en compte dans les simulations énergétiques des bâtiments. »⁹⁵

Ceci montre bien qu'aujourd'hui tous les éléments impactant les transferts thermiques ne sont pas pris en compte pour les calculs thermiques des

parois en pierre. Il est donc important de réaliser ces calculs à l'aide de logiciels de simulation adaptés.

3.2.4.2_ Influence de l'humidité et des rayonnements sur les transferts thermiques

La capacité hydrique des matériaux naturels comme la pierre induit un taux d'eau présent dans le matériau. Ce taux d'eau se régule, est variable selon l'épaisseur du mur de pierre et fluctue selon la période de l'année. Comme présenté plus haut, cette régulation se fait naturellement. Néanmoins, le taux d'humidité présent dans la pierre à un impact sur l'élément le plus important utilisé lors du calcul des flux thermiques : la conductivité.

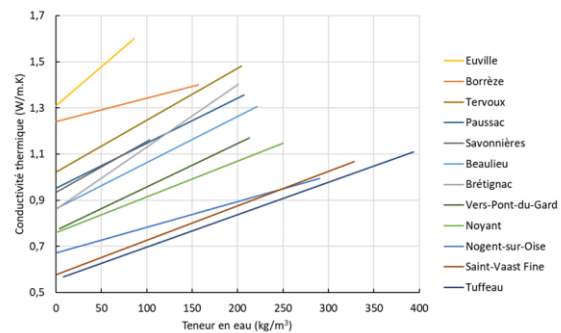


Figure 68 : Conductivité thermique des pierres en fonction de la teneur en eau massique (Source : PESTRE, 2021)

En effet, si la pierre, poreuse, se remplit d'eau, les échanges thermiques se font à travers la pierre et l'eau. L'eau étant plus conductrice que l'air, la conductivité thermique d'une pierre saturée en eau est plus importante qu'une pour une pierre sèche (Figure 68).

3.2.4.3_ Travaux de recherche sur les propriétés hygrothermiques des matériaux naturels

La pierre

Dans sa thèse, PESTRE énumère son état de l'art de l'étude des propriétés des roches, parmi ce dernier, on retrouve plusieurs recherches sur les propriétés hygrothermiques des roches :

- Zhao et Plagge [35] ont étudié les propriétés thermo-hydriques
- Wu [39] a étudié le comportement thermique de parois de bâtiments suivant différentes approches.

⁹⁵ PESTRE, Tristan, 2021. La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction,

étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments. phd thesis. Université d'Artois.p.49.

- Liu et al. [41] ont étudié la conductivité thermique de 745 pierres carottées dans le bassin de Tarim en Chine, afin de pouvoir étudier le régime thermique de ces bassins sédimentaires.
- Genova et Fatta [45] ont travaillé à combler le manque de données sur les caractéristiques hygrothermiques des matériaux composants l'enveloppe des bâtiments historiques de Sicile en Italie.
- Hoxha et al [51] ont analysés des pierres calcaires françaises présentes dans la vallée de la Loire dans le cadre du projet SACRE, de modélisation des phénomènes thermo-hydro-mécaniques pouvant affecter les parois de monuments historiques à long terme
- Roels [54] a mesuré et simulé les transferts d'humidité dans des matériaux de construction poreux comme la pierre calcaire de Savonnière (proche de Bar le Duc en France).
- Stephan [56] s'est intéressé à la réhabilitation du bâti ancien construit en pierre de Tuffeau.

Parmi ces études, on retrouve peu de valeurs utilisables pour l'analyse hygrothermique des pierres en France complémentaires à celles déterminées dans la thèse de PESTRE. Son travail servira alors de base de données pour les expériences à réaliser.

Complémenter la maçonnerie au niveau de la paroi : le mélange chaux/chanvre

Lors des études plus poussées au niveau de la paroi, et comme énoncé lors de la méthode de recherche générale, la pierre devra être couplée à de l'isolant ou à un enduit. Comme vu précédemment, le phénomène de paroi froide peut-être rattrapé par un complément non isolant mais créant une coupure afin d'éviter la paroi froide.

Dans la conclusion de sa thèse, PESTRE évoque ce sujet : « *Il est alors nécessaire de l'associer (la pierre) à des matériaux isolants. Dans la dynamique contemporaine de volonté de préserver l'environnement, les matériaux isolants biosourcés, agro-sourcés ou issus du recyclage sont amenés à être de plus en plus valorisés et donc étudiés et*

*utilisés... Il apparaît alors crucial de connaître le comportement conjoint de ce type de matériaux avec les pierres naturelles. »*⁹⁶

Dans ce cas, il existe différents matériaux pouvant répondre à ce besoin comme le béton de chanvre.

*« Le béton de chanvre est un mélange dans des proportions très variables de deux constituants de nature très différente, à savoir un granulats d'origine végétale et un liant à prise hydraulique et aérienne. »*⁹⁷

Dans notre cas, le liant utilisé est la chaux et le granulats est le chanvre. Cet assemblage naturel permet donc la création d'un béton allégé.

*« Dans la construction, le béton de chanvre est considéré comme un nouvel éco-matériau car il ne fait l'objet de recherches scientifiques que depuis une vingtaine d'années. D'une manière générale, le béton et le mortier de chanvre sont obtenus en mélangeant la chènevotte avec un liant à base de chaux et d'eau. La variation des proportions entre la chènevotte et le liant permettent d'obtenir des matériaux ayant différentes caractéristiques mécaniques, thermiques et acoustiques... »*⁹⁸

La Région Basse-Normandie nous donne aussi dans son étude un résumé des valeurs à utiliser pour l'utilisation du béton de chanvre au niveau des murs :

« Règles Professionnelles d'Exécution Béton de chanvre (données Murs) :

- *Densité sèche : 420 kg/m³*
- *Module d'élasticité à 28 jours : 20 MPa*
- *Résistance à la compression à 28 jours : 0,3 MPa*
- *Conductivité thermique : 0,10 W/m.K*⁹⁹

De plus, le travail de CÉRÉZO présente « *une étude des transferts de chaleur et de masse au sein du matériau sous diverses hygrométries* »¹⁰⁰. Dans cette thèse, il est donc démontré les différentes propriétés thermiques et hydriques du béton de chanvre.

Sa conductivité thermique fait que ce matériau peut être un bon isolant associé à une épaisseur plus importante qu'un isolant classique.

⁹⁶ PESTRE, Tristan, 2021. La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments. phd thesis. Université d'Artois. p.223.

⁹⁷ CÉRÉZO, Véronique, 2005. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. thesis. Lyon, France : INSA. p.48.

⁹⁸ Rénovation Thermique du bâti traditionnel Normand, 2013. Région Basse-Normandie. p.60.

⁹⁹ Ibid. p.61.

¹⁰⁰ CÉRÉZO, Véronique, 2005. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. thesis. Lyon, France : INSA. p.11.

3.3_ Conception architecturale et simulation énergétique

Cette partie présente l'importance de la conception architecturale pour l'atteinte des besoins identifiés précédemment ainsi que pour le respect des objectifs fixés par la réglementation énergétique. Dans un premier temps, seront étudiées les simulations énergétiques et leur intégration dans le processus de conception. Dans un second temps, seront présentés les différents objectifs énergétiques définis par la réglementation française.

3.3.1_ Simulation énergétique

3.3.1.1_ La simulation énergétique en architecture

L'optimisation énergétique a toujours fait partie de la conception architecturale, mais pas de la manière dont on pourrait le penser aujourd'hui, car les outils n'étaient pas les mêmes. L'optimisation passait par l'expérimentation à échelle réelle et la transmission de toutes les conclusions qui ont émergé de ces tentatives. Même si l'avancée des mathématiques ont permis de développer les calculs, l'efficacité énergétique dépend de nombreux facteurs tous liés les uns aux autres, ce qui rend la prédiction encore plus compliquée. Néanmoins, l'approche empirique a tout de même permis de développer des solutions climatiques très efficaces.

Les nouveaux matériaux, ouvrant alors de nouvelles possibilités architecturales, ont permis de développer l'architecture mais bien souvent au détriment de l'efficacité énergétique. Alors dans les années 1970, les premiers calculs énergétiques ont vu le jour. Puis l'arrivée du calcul assisté par ordinateur et des premiers logiciels ont permis de développer les calculs énergétiques, comme le logiciel OASIS en France.

Même si la notion d'efficacité énergétique à toujours existée avec l'émergence du « *design bioclimatique* »¹⁰¹, l'arrivée des logiciels de simulation énergétique ont facilité l'intégration de cette notion dans la conception architecturale.

3.3.1.2_ Phase d'intervention des calculs énergétiques et méthodes de calculs employées

Historiquement et surtout en France, les calculs énergétiques sont réalisés par les ingénieurs lors des phases d'études souvent bien tardive.

Les phases d'études de projet et d'étude d'exécution sont placés une fois la majorité du projet dessiné, après la phase APD. La simulation énergétique à l'échelle du bâtiment vient donc durant ces phases d'études. Les phases d'études permettent, à l'image des études structures pour le dimensionnement, d'ajuster les choix en lien avec les objectifs thermiques.

Ces ajustements ne pourront pas se faire à l'échelle du bâti, de la forme ou même des ouvertures. La plupart des ajustements se feront au niveau de la paroi ou des toitures. Les solutions passives et les éléments principaux présentés en partie 3.1.1 sont constituants du projet et doivent être pris en compte dès la phase de conception du projet.

3.3.2_ Importance du processus de conception

3.3.2.1_ Utiliser les matériaux comme point de départ du processus de construction [référence au tier 1]

Les matériaux constituent un des points de départ de l'architecture. Ils sont tant la ressource que le médium d'un architecte.

De nombreux architectes, de nos jours, ancrent leur travail par un choix réfléchi de la matérialité, et ce, dès le début de la phase de conception. Parmi, ces architectes on retrouve Régis Roudil, Boris Bouchet et Gilles Perraudin.

Lors d'une interview pour D'a, Régis Roudil exprime ses principes de réflexion du projet :

*« Un rapport précis avec le paysage proche et lointain, une lisibilité de la forme architecturale, un grand soin dans l'organisation du plan, la présence de la structure en façade garante d'une « honnêteté constructive », un souci du détail qui rayonne sur la globalité du projet. »*¹⁰²

Son intérêt porte bien en partie sur la matérialité, puisqu'il insiste sur une honnêteté constructive'. Par la suite dans cette interview, il nomme 4 points

¹⁰¹ OLGAY, Victor, YEANG, Ken, REYNOLDS, John, OLGAY, Victor et LYNDON, Donlyn, 2015. Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and expanded Edition. Princeton: Princeton University Press. p. ix.

¹⁰² Interview de Régis Roudil, réalisée par David Leclerc, dans : BERTHIER, Stéphane, 2022. Le renouveau de l'architecture en pierre. d'architectures. février 2022. Vol. n°296. p.6

principaux qui guident sa réflexion du projet : masse, matière, lumière et proportions. Par la suite, David Leclerc résume ses propos :

“Chacun de ses projets commence par le choix du matériau, car c’est lui, insiste-il, qui fabrique l’architecture.”¹⁰³

Lors du processus de conception architectural, une réflexion orientée par le choix du matériau engendrera des dispositifs techniques dont thermiques et bioclimatiques adaptés à ce dernier.

Même si certains architectes pensent ainsi, la production des constructions modernes et parfois encore contemporaine s’est exempté de cette réflexion. Lors d’une interview de Gilles Perraudin, Valéry Didelon lui pose cette question :

Tu associes souvent le formalisme de l’architecture contemporaine à l’usage du béton armé. Peux-tu nous en dire un peu plus ?

Gilles Perraudin répond :

« Si le béton a libéré les architectes de certaines contraintes que l’on associe à la construction traditionnelle, il les a complètement rendus dépendants de la forme. Seul Louis Kahn par exemple a su s’imposer une discipline et ne pas devenir esclave de celle-ci. »¹⁰⁴

L’architecture moderne est principalement devenue esclave du béton d’un point de vue constructif. Son approche a toujours été orienté d’un point de vue écologique. Gilles Perraudin présente d’ailleurs les principes qui dirigent sa conception architecturale dans un petit ouvrage nommé *La pierre : matériau écologique* :

« ...mon architecture se fonde sur les principes suivants :

- utilisation de matériaux renouvelables (bois, terre, verre, acier, pierre) ;
- mise en œuvre de dispositifs d’économie d’énergie (double façade, enveloppe micro climatique, bâtiment épais) ;
- utilisation des énergies renouvelables (vent, soleil,...) ;

Cette démarche, proche des architecture vernaculaires, renverse et contredit fortement ce que les mouvements d’avant-garde du XXIème siècle ont voulu instituer.... »¹⁰⁵

¹⁰³ Ibid.

¹⁰⁴ Interview de Gilles Perraudin par Valéry Didelon dans : NUSSAUME, Yann, 2012. Gilles Perraudin. Dijon : Les presses du réel. Collection architecture. p.112.

¹⁰⁵ PERRAUDIN, Gilles, 2004. La pierre : matériau écologique. 2004. Université Languedoc-Roussillon. p.1

Il continu à la page suivante :

« ...cette démarche se propose de retrouver une dimension tectonique de l’architecture : une architecture profondément influencée par son contexte aussi bien physique, géographique climatique que culturel au travers notamment des cultures constructives qu’elle utilise »

La conception architecturale en lien avec les principes bioclimatiques présentés dans la partie 3.1.1 doit suivre ces principes afin d’assurer une production durable. De plus, les choix fait dans la conception du projet sont très compliqués à changer.

3.3.2.2_ Relation entre intégration d’éléments et avancement du projet

Norbert Lechner introduit dans la préface de son livre *« Heating, Cooling, Lighting »* présenté pus tôt pour la méthode des trois tiers, l’importance du processus de conception vis-à-vis de l’impact des choix faits par rapport au temps du projet.

« Les conceptions de bâtiments durables sont principalement le fruit des décisions prises au tout début du processus de conception plutôt que des ajouts et des décisions pris par les ingénieurs après que la conception architecturale du bâtiment a été pratiquement achevée. »¹⁰⁶

La courbe représentée dans la Figure 69 permet de visualiser la décroissance exponentielle de l’efficacité d’une décision par rapport au temps qui s’écoule dans les phases de réalisation d’un projet. L’ensemble des décisions prises et implémentées le plus tôt possible, et donc lors du processus de conception, auront le plus d’impact sur le projet. Il est en effet bien plus simple de prendre en compte

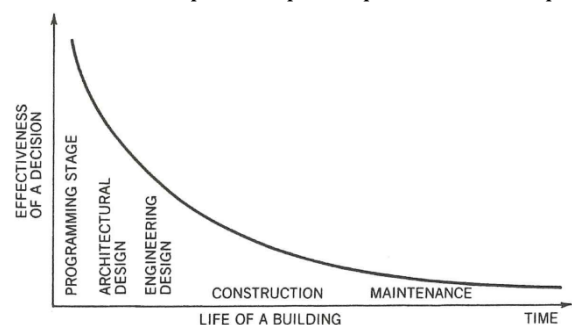


Figure 69 : Efficacité des décisions prises pour un projet par rapport au temps (Source : LECHNER, 2014)

¹⁰⁶ Traduit de : “designs for sustainable buildings are achieved primarily by the earliest decisions in the design process rather than by add-ons and engineering decisions made after the architectural design of the building has been essentially completed”. LECHNER, Norbert, 2014. Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects. John Wiley & Sons. p.xvii.

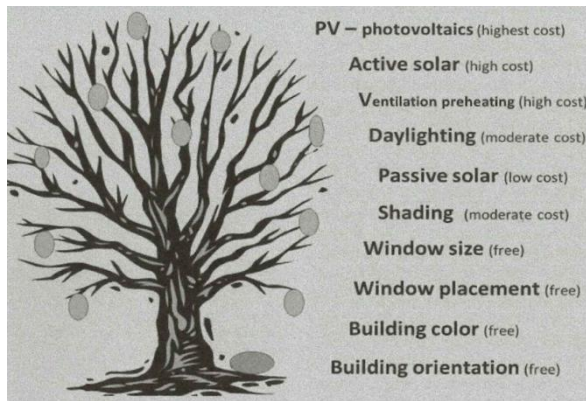


Figure 70 : Coût de quelques solutions utilisables pour réaliser un bâtiment durable (Source : LECHNER, 2014)

l'ensemble des variables du premier et deuxième tiers (partie 3.1.2) au début que plus tard lorsque l'esquisse a été validée. Les premières décisions ont donc le plus d'impact.

Le postulat que l'orientation, la forme et les matériaux ont le plus d'impact sur la durabilité du projet va donc avec le fait que ces choix sont réalisés au début du projet et ne peuvent pas être modifiés plus tard. Les modifications pouvant donc être ajoutés par les ingénieurs ou autres sont majoritairement représentés par les solutions du troisième tiers (Figure 11) et partiellement du deuxième tiers.

De plus, une courbe identique peut-être réalisée entre le temps et le coût que représente une modification du projet. LECHNER le représente simplement à l'aide d'un arbre (Figure 70) et présente quelques exemples de solutions liées au coût qu'elles représentent.

De plus, il ajoute :

« Étant donné que les niveaux un et deux relèvent du domaine de l'architecte, le rôle de l'ingénieur au niveau trois consiste uniquement à fournir le chauffage, la climatisation et l'éclairage que l'architecte n'a pas pu fournir. »¹⁰⁷

Même si aujourd'hui les ingénieurs sont aussi intégrés aux processus de conception, les solutions qu'ils proposent ne changent pas le projet conçu. C'est alors à l'architecte de concevoir un projet en lien avec les méthodes bioclimatiques.

3.3.3_ Analyse énergétique et conception architecturale

3.3.3.1_ Application des méthodes bioclimatiques

Les simulations énergétiques sont principalement réalisées sur un projet en fin de phase de conception par les ingénieurs. Or, si l'architecte doit concevoir avec les méthodes bioclimatiques son projet, il peut se baser sur la littérature, des références et son expérience. Mais il ne pourra pas réellement savoir si les solutions architecturales mises en place fonctionnent réellement.

Il est donc question de concevoir avec un logiciel permettant de réaliser des simulations énergétiques sur différents sujets tels que l'irradiation solaire, les flux d'air et de vent, les calculs thermiques, etc.

3.3.3.2_ Logiciels de simulations adaptés

Aujourd'hui, le développement de certains logiciels a permis de créer des écosystèmes permettant d'intégrer les simulations énergétiques à la phase de conception.

De plus, l'attrait pour l'optimisation moderne des calculs mis en avant par le Machine Learning et l'Intelligence Artificielle est guidée par des algorithmes de plus en plus performants. L'apparition d'une simplification d'algorithmes d'optimisation a vu le jour dans les logiciels de conception architectural.

Le cas le plus connu est celui de *Rhino*®, qui intègre un éditeur via un principe de script depuis la version 6, *Grasshopper*®. Cette extension permet la création dans *Rhino*, qui devient un outil de visualisations, de designs dits paramétriques.

Grasshopper® permet l'ajout de plugins s'intégrant complètement au système de scripts visualisables dans *Rhino*®. Il existe de nombreux plugins développés par McNeel et des tiers et ce dans différents domaines comme l'analyse structurelle, l'analyse environnementale, la simulation énergétique, l'optimisation d'un script, etc.

C'est avec *Ladybug Tools* (Roudsari & Pak, 2022) que l'intégration de l'analyse environnementale est faite jusqu'à la simulation énergétique à l'aide de *EnergyPlus* via *OpenStudio* (US Department of Energy, 2022; National Renewable Energy Laboratory, 2022). L'intégration de ces outils permet alors la simulation et même l'optimisation

¹⁰⁷ Traduit de: "Since tiers one and two are the domain of the architect, the role of the engineer at the third tier is to provide only the heating, cooling, and lighting that the architect could not".

LECHNER, Norbert, 2014. Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects. John Wiley & Sons. p.xvii.

d'un modèle simpliste d'un projet architectural lors de la phase de conception. Les paramètres sont modélisés par l'utilisateur puisque l'entièreté du script est unique et est à assembler de toute pièce.

Ce type d'écosystème permet alors la mise à disposition à l'architecte d'outils de simulation de performances énergétiques efficaces ouvrant la porte à une méthode de conception bioclimatique contemporaine.

Appliquée à l'architecture en pierre, l'analyse énergétique fonctionne au même titre que l'analyse énergétique des bâtiments en béton. Néanmoins, comme le défend Michel Goutal, l'analyse exercée dans ces cas-là ne prend pas en compte toutes les caractéristiques de la pierre.

« Les calculs d'efficacité des bâtiments sont faits pour d'autres matériaux, nous sommes en train de les adapter pour vérifier que la pierre peut aussi être performante, il suffira ensuite d'adapter sa mise en œuvre. On trouvera, c'est sûr. »¹⁰⁸

De ce fait, l'analyse énergétique doit être dynamique, c'est-à-dire prendre en compte les éléments extérieurs.

3.3.3.3_ Projets de recherche pour guider la conception architecturale bioclimatique

En France, il existe plusieurs projets de recherche pour approfondir les données dans ce domaine dont le projet OEHM terminé en 2022 dont les axes (nommés WP pour WorkPackages) d'études principaux sont les suivants :

- 1) WP1 : Expérimentation matériaux
- 2) WP2 : Modélisation
- 3) WP3 : Essais sur structures et habitas instrumentés
- 4) WP4 : Typologie et morphologie adaptées au climat méditerranéen

Ce projet vise notamment à prendre en compte les particularités des calculs hygrothermiques dans les calculs de performance énergétiques. La pertinence de ce type de recherche démontre le besoin de production de connaissance dans ce domaine à l'échelle nationale. De plus, un des arguments pour la pertinence est indirectement énoncé dans la thèse de SANSEN¹⁰⁹ (faisant aussi partie du projet

OEHM) qui est que le réchauffement climatique annonce qu'il existe une possibilité que le climat méditerranéen s'étende sur le Nord et l'Ouest de la France. Cette possibilité est retranscrite dans une des cartographies de la classification des climats de Köppen-Geiger selon un scénario d'émission A1F1 (Tyndall SC 2.03) sur la période 2076-2100¹¹⁰.

¹⁰⁸ Interview de Michel Goutal réalisée par SABBAH Catherine dans la partie, L'âge de pierre, vers une renaissance (pp.50-55) dans : BORNE, Emmanuelle et FONTÈS, François, 2017. Construire en pierre. L'Architecture d'Aujourd'hui. mars 2017. Vol. n°417.

¹⁰⁹ SANSEN, Marjan, 2022. Typologies architecturales et morphologies urbaines adaptées au climat méditerranéen. phd thesis. Université de Montpellier.

¹¹⁰ Disponible sur le site officiel dans l'onglet « Climate shifts » au lien suivant : <https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm>

4_ Approche méthodologique et cadre d'étude

4.1_ Méthodologie de recueil et d'analyse des données

4.1.1_ Des méthodologies existantes sur lesquelles prendre exemple

4.1.1.1_ Traitement et analyse du Vernaculaire

4.1.1.2_ Expérience sur les transferts thermiques d'une paroi en pierre porteuse

4.1.1.3_ Méthode d'analyse par optimisation paramétrique selon la méthode ENAPE

4.1.2_ Logiciels utilisés

4.1.2.1_ Analyse hygrothermique au niveau de la paroi

4.1.2.2_ Simulation énergétique STD à l'échelle du bâti

4.1.3_ Protocole d'Analyse

4.1.3.1_ Analyse hygrothermique au niveau de la paroi

4.1.3.2_ Simulation énergétique STD à l'échelle du bâti

4.2_ Définitions des zones et éléments d'étude

4.2.1_ Une architecture traditionnelle : échelle régionale

4.2.1.1_ Nord-Ouest de la France : Rennes

4.2.1.2_ Sud-Est de la France : Marseille

4.2.2_ Pierres choisies pour l'analyse

4.1_ Méthodologie de recueil et d'analyse des données

Les méthodologies reflètent la structure d'un raisonnement scientifique, il est important de définir la méthode clairement avant de l'employer afin d'assurer une ligne de suivi correcte.

4.1.1_ Des méthodologies existantes sur lesquelles prendre exemple

Cette partie permet alors de présenter en trois temps les méthodologies employées. Dans un premier temps sera présenté une méthode d'analyse de l'architecture vernaculaire à l'échelle d'un pays en lien avec la condition climatique de ce dernier. Dans un second temps, l'accent sera mis sur la méthode scientifique employée dans l'analyse de comportement thermique de la pierre à l'échelle de la paroi. Troisièmement, il conviendra d'expliquer une méthode employée dans l'optimisation des performances énergétiques par modélisation architecturale des solutions bioclimatiques. Pour finir, des exemples de visualisation des résultats des analyses énergétiques et thermiques seront présentés afin d'assurer une transmission claire des résultats obtenus.

4.1.1.1_ Traitement et analyse de l'architecture vernaculaire

Une partie de la recherche propose une approche volontairement synthétique de l'architecture vernaculaire française, utilisée comme une base de données afin d'identifier, de manière générale, des réponses architecturales aux différentes conditions climatiques du territoire.

Pour cette partie je me suis appuyé sur l'article suivant : *Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture* écrit par CAÑAS, Ignacio et MARTÍN, Silvia.¹¹¹

Cette analyse rapide s'appuie sur une lecture globale du climat national, complétée par des cartes régionales associant paramètres climatiques et stratégies passives observées.

La méthodologie est la suivante :

La première étape consiste à établir une lecture globale du climat à l'échelle nationale. Elle comprend l'identification des principaux paramètres climatiques et de leurs variations sur le territoire, ainsi que la recherche et la production de

cartes nationales représentant chacune les conditions climatiques étudiées.

Dans un second temps, il s'agit de définir un ensemble cohérent de stratégies passives pertinentes pour le pays étudié, en s'appuyant notamment sur l'article de référence. Un corpus d'architectures traditionnelles locales est ensuite constitué, sélectionné pour l'intérêt de leurs typologies au regard de ces stratégies. Ce jeu de données est trié et analysé selon des critères précis (localisation, échelle administrative, stratégie passive détaillée, classification, numérotation), avant de définir et présenter clairement chaque stratégie passive retenue. Les cas d'étude sont ensuite associés à ces stratégies, puis représentés par des premières visualisations, notamment cartographiques.

Les cartes climatiques sont ensuite superposées à la localisation des cas d'étude utilisant les stratégies passives correspondantes, afin d'observer leur adéquation avec les conditions climatiques locales. Ce processus est répété pour l'ensemble des stratégies et des paramètres climatiques identifiés.

Enfin, les résultats sont analysés pour vérifier la cohérence entre l'implantation des solutions passives et les conditions climatiques locales. Les conclusions sont présentées par stratégie passive, en s'appuyant sur des cas d'étude détaillés, permettant d'évaluer la pertinence de ces stratégies comme premières réponses architecturales aux contextes climatiques.

Cette méthode d'analyse vise à établir une vision d'ensemble de l'architecture traditionnelle afin d'évaluer sa pertinence en matière d'adaptation climatique. Bien que, comme l'a montré Amos Rapoport, la typologie architecturale ne dépende pas uniquement du climat, la superposition des données climatiques et architecturales permet d'identifier les éléments réellement liés à cette adaptation et d'en tirer des lignes directrices applicables aux projets contemporains. Le patrimoine vernaculaire, souvent étudié de manière trop locale, constitue ainsi une ressource précieuse pour fonder une conception architecturale orientée vers l'efficacité énergétique à partir de principes simples. À l'image de l'article de référence, qui s'appuie sur un corpus étendu de cas d'étude issus de la littérature sur l'architecture vernaculaire espagnole, il est nécessaire de constituer un ensemble suffisamment large de données afin d'assurer la pertinence de l'analyse. Les objectifs poursuivis sont donc similaires à ceux énoncés par les auteurs :

¹¹¹ CAÑAS, Ignacio et MARTÍN, Silvia, 2004. *Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture*.

Building and Environment. 1 décembre 2004. Vol. 39, n° 12, pp. 1477-1495.

« L'objectif de cet article est de déterminer les stratégies de conception utilisées dans les constructions vernaculaires pour les adapter à l'environnement. Les résultats de l'étude peuvent être utilisés sous deux formes différentes : (1) faire une proposition pour la récupération des constructions vernaculaires avec des stratégies bioclimatiques particulières ; (2) traduire certaines des stratégies bioclimatiques utilisées dans les constructions vernaculaires dans les constructions actuelles. »¹¹²

4.1.1.2_ Expérience sur les transferts thermiques d'une paroi en pierre porteuse

L'étude d'un comportement localisé comme le transfert thermique nécessite une méthode d'expérimentation claire et précise et étudiée selon un objectif précis. Comme présenté précédemment, l'analyse de ce comportement sur un matériau poreux comme la pierre dépend de nombreuses variables, il est donc important de suivre une méthodologie afin de ne pas se perdre parmi ces variables.

Lors de mes recherches, une analyse m'a permis d'en comprendre bien plus sur les échanges thermiques pour les parois en pierre. J'ai donc pris exemple sur la méthodologie de la thèse suivante réalisée par Tristan PESTRE : *La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments*.¹¹³

Dans un premier temps, une partie de l'analyse porte sur les différentes pierres en France à analyser en fonction des carrières et des productions. Pour cette partie, je vais reprendre les pierres qui ont été étudiées afin de bénéficier des données sur ces dernières. En effet, sa thèse comporte une expérience sur la détermination des propriétés hygrothermiques de certaines pierre calcaires françaises. N'ayant pas trouvé ces données autre part pour des pierres françaises, je devrais utiliser celles-ci.

J'ai donc adapté la méthodologie employée à ma recherche :

Établissement d'un ensemble de données pertinent pour l'analyse numérique :

- 1) Recueil de données primaires sur les différentes pierres étudiées.

- 2) Présentation des variables caractérisant chaque pierre, servant à structurer et décrire le jeu de données.
- 3) Classification des roches en fonction de leurs propriétés physiques.
- 4) Recueil des données nécessaires à la simulation numérique, comprenant notamment les variables suivantes (définies par PESTRE dans sa thèse) :

- La masse volumique
- La conductivité thermique sèche
- La conductivité thermique humide
- La porosité
- La perméabilité à la vapeur d'eau
- La diffusivité liquide

Réalisation de l'analyse par simulation numérique :

- 1) Définition des différents cas de simulation à partir de variables principales, susceptibles d'être en partie les suivantes :
 - Combinaisons de parois (pierre, pierre-isolant, pierre-isolant-pierre, etc.)
 - Localisation (conditions climatiques)
 - Type de pierre, afin de tester une partie ou l'ensemble de l'échantillon constitué
- 2) Si nécessaire, recherche des données complémentaires relatives aux nouveaux matériaux intégrés aux simulations (notamment les isolants).
- 3) Si le logiciel utilisé est COMSOL, cette étape peut être ignorée en raison de sa fiabilité démontrée par PESTRE. Dans le cas contraire, il est nécessaire de réaliser une étude comparative avec COMSOL ou de s'appuyer sur une étude existante validant la fiabilité du logiciel pour les calculs thermiques, en particulier pour des cas multifactoriels comme ceux impliquant la pierre.
- 4) Réalisation des simulations à l'aide du logiciel sélectionné.
- 5) Visualisation et analyse des résultats en fonction des variables retenues (combinaisons

¹¹² Traduit de « *The aim of this paper is to determine the design strategies used in vernacular constructions to adapt them to the environment. The results of the study can be used in two different forms: (1) to make a proposal for the recovery of vernacular constructions with peculiar bioclimatic strategies; (2) to translate*

some of the bioclimatic strategies used in vernacular constructions to the present ones. » dans: Ibid.

¹¹³ PESTRE, Tristan, 2021. *La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments*. Thèse. Université d'Artois.

de parois et situations climatiques).

- 6) Interprétation des résultats et formulation des conclusions.

Cette expérimentation effectuée au travers de simulations numériques suit alors une logique simple d'expérimentation scientifique tenant à établir des résultats selon des critères précis. Le choix du logiciel pourra influencer légèrement cette méthodologie, COMSOL est démontré comme fiable selon la comparaison réalisée par PESTRE, il serait à la fois pertinent d'utiliser le même logiciel sur un jeu de donnée différent ou alors de changer de logiciel afin de tester le même jeu de donnée puis un autre. COMSOL présente de nombreux avantages et représente un modèle complexe de simulation, néanmoins il se peut que l'accessibilité au logiciel m'oblige à en utiliser un autre.

De plus, il me paraît intéressant de continuer la recherche dans ce domaine avec l'utilisation d'isolants biosourcés comme le présente PESTRE dans sa thèse : « *Le LGCgE dispose justement de données hygrothermiques sur des éco-matériaux isolants, obtenues dans le cadre de la thèse de M. ASLI, comme la fibre de bois, de chanvre, la laine de mouton, de lin et la ouate de textile recyclée (Métisse®). Ces derniers sont réputés pour avoir des impacts environnementaux faibles et des propriétés hydriques et thermiques intéressantes.* »¹¹⁴

Il a pourtant utilisé de la laine de bois et de la laine de verre dans son étude, les combinaisons pourraient alors être diversifiées et approfondies.

Ces simulations représentent un réel intérêt pour l'avancée de la recherche dans ce domaine : « *L'originalité de nos recherches réside dans l'analyse conjointe des propriétés thermiques, hydriques, mais aussi environnementales d'un échantillonnage important de pierres françaises. De plus, le rapprochement concret avec la réglementation thermique et environnementale à venir doit permettre aux professionnels de la construction de pouvoir prescrire et valoriser ce matériau aux multiples atouts. La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité est amenée à se développer et nous pouvons imaginer que les échanges hydriques soient, à l'avenir, davantage pris en compte dans les simulations énergétiques des bâtiments.* »¹¹⁵

Les expérimentations au niveau de la paroi se placent donc dans cette continuité de recherche.

4.1.1.3_ Méthode d'analyse par optimisation paramétrique selon la méthode ENAPE

ENAPE : Exploration Numérique de Solutions Architecturales pour la Performance Environnementale

Après avoir obtenu des données en ayant suivi les deux méthodes présentées précédemment, la dernière consiste alors à les lier dans la réalisation d'une expérience d'optimisation énergétique. Cette expérience a pour but de coupler les solutions passives efficaces pour chaque condition climatique en France aux différents cas d'optimisation de la paroi en pierre évalués par les analyses en fonction de la localisation et du type de pierre. Une fois ces deux éléments couplés il conviendra donc de comprendre la corrélation et l'importance de chaque élément dans le résultat donné par la simulation énergétique. Le but est alors de réaliser une optimisation multi-paramétrée d'une maison expérimentale afin d'établir une relation entre chaque critère et son impact sur l'efficacité énergétique globale.

De nombreuses méthodes scientifiques de ce type sont présentés dans de nombreux articles et a été rassemblée au sein d'une seule méthode, suivant les lignes précises. Cette méthode est présentée dans la thèse de Claire DUCLOS-PRÉVET : *La modélisation des processus d'exploration numérique en Architecture.*

« *L'ENAPE est une méthode de conception computationnelle à la fois générative et performancielle où l'un des critères au moins est environnemental, impliquant l'usage de la conception paramétrique, et permettant potentiellement de faire de la conception intégrée. Pour faire de l'ENAPE, il s'agit d'élaborer un script pour un problème de conception architectural donné permettant de générer une grande quantité de solutions évaluées selon un ou plusieurs critères de performance environnementale qu'il convient alors d'explorer pour en déduire un optimum.* »¹¹⁶

Cette méthode consiste alors en 5 étapes (Figure 71) :

- 1) Analyser
- 2) Prototyper
- 3) Évaluer
- 4) Évoluer
- 5) Sélectionner

performance et optimisation. Paris : Conservatoire national des arts et métiers. p.54

¹¹⁴ Ibid, p.229.

¹¹⁵ Ibid, p.49.

¹¹⁶ DUCLOS-PRÉVET, Claire, 2024. La modélisation de processus d'exploration numérique en architecture : design génératif,

Ces cinq étapes sont très générales et sont à adapter à l'élément qui requiert une analyse.

De plus, dans la thèse il est présenté les outils nécessaires à ce type de méthode :

1) Les outils d'analyse

Ces derniers représentent les logiciels qui permettent de réaliser la forme géométrique qui sera étudié, ainsi que le logiciel de simulation (efficacité énergétique).

2) Les outils d'optimisation

Ces outils sont des plugins intégrés à Grasshopper dans ce cas, il est important d'utiliser un algorithme d'optimisation adapté (mono-paramétré, pluri-paramétré).

3) Les outils de visualisation

Les outils de visualisation sont à définir et dépendent des types de simulations réalisées.

L'écosystème de *Rhino*© utilisé dans cette méthode est présenté dans la Figure 72. Néanmoins, cette méthode est générale et fonctionne sur un principe d'optimisation paramétrique à l'aide d'algorithme d'optimisation intégrés aux outils d'analyse et de simulation. Les STD demandant un temps de calcul élevé pour les simulations complexe, les algorithmes de d'optimisation ne sont pas forcément adaptés. Du moins, j'ai décidé de ne pas en utiliser. La méthode d'analyse restera la même.

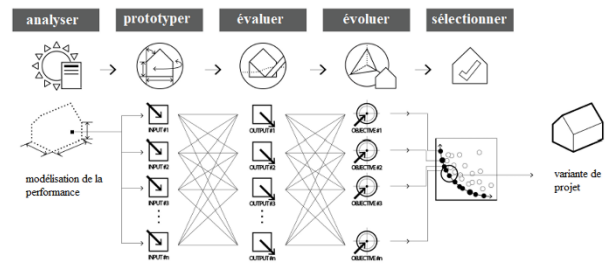


Figure 71 : Les cinq étapes de la mise en pratique d'un processus d'ENAPE (Source : SHEN, X., et al., 2018)

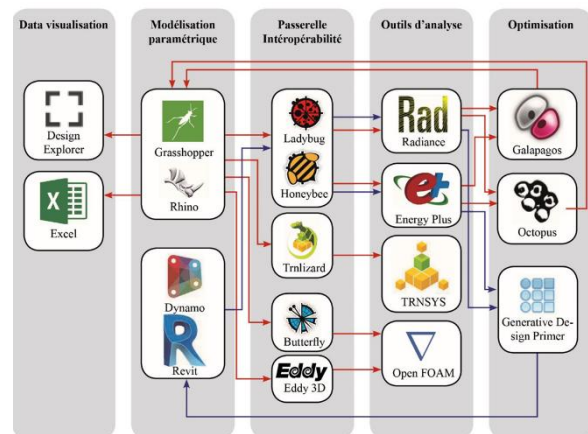


Figure 72 : Le diagramme de flux des données pour faire de l'ENAPE avec l'écosystème développé autour de Rhino et de Grasshopper (Source : DUCLOS-PRÉVET, 2024)

4.1.2_ Logiciels utilisés

Cette partie a pour but de présenter et justifier le choix des logiciels utilisés pour la réalisation des expérimentations.

4.1.2.1_ Analyse hygrothermique au niveau de la paroi

Il a été présenté dans la partie 3, les différents éléments justifiant l'importance des analyses hygrothermique à l'échelle de la paroi. Il est donc maintenant question de savoir avec quel logiciel il est possible de réaliser ce type de simulations.

4.1.2.1.1 Les logiciels de simulation hygrothermiques

Dans un premier temps, il est important de présenter le logiciel que je compte utiliser pour l'ensemble de mes expérimentations à l'échelle de la paroi. Comme présenté précédemment, la pierre nécessite un logiciel de simulation de transferts hygrothermiques. En effet, l'humidité impact de plusieurs manières les transferts de température au sein d'une paroi et est donc à prendre en compte lors des calculs de transferts. Son importance est aussi démontrée pour son utilisation dans le diagramme psychrométrique. La quantité de logiciels permettant de faire ses simulations diminue drastiquement.

Les plus connus pour les simulations hygrothermiques à l'échelle de la paroi sont les suivants :

- COMSOL
- WUFI
- DELPHIN
- hygIRC
- EnergyPlus
- HAM-Tools

Bien que tous ces logiciels auraient pu me permettre de répondre au besoin présenté par l'étude, certains facteurs entrent en compte comme la courbe d'apprentissage ainsi que l'accès. L'accessibilité à ces logiciels est difficile et requiert des licences. WUFI et COMSOL étaient les seuls auxquels j'avais accès. Suite à plusieurs lectures, il m'a paru que WUFI est le meilleur choix au vu de la précision des résultats et de la 'facilité' de manipulation. COMSOL nécessite une courbe d'apprentissage importante et beaucoup plus de manipulation pour chaque simulation tandis que WUFI est plus simplifié dans la définition des

paramètres de simulation. COMSOL aurait été plus adapté si mes recherches avaient duré plus longtemps. WUFI est accessible via une licence de 6 mois pour les étudiants faisant de la recherche dans le cadre d'un master, une thèse ou autre.

Les simulations hygrothermiques seront donc réalisées avec le logiciel WUFI.

4.1.2.1.2 Le logiciel WUFI

Le logiciel WUFI se découpe en 3 sous logiciels permettant de faire des simulations en 1D (WUFI Pro), 2D (WUFI 2D) et en 3D (WUFI Plus).

Dans ce mémoire, uniquement WUFI Pro a été utilisé, pour une analyse à une seule dimension au niveau de la paroi en pierre sans traitement particulier pour les zones de ponts thermiques.

L'analyse à l'échelle du bâti se faisant avec un autre logiciel (voir partie suivante, 4.1.2.2.1) pour des raisons de modélisation architecturale et de compatibilité avec le processus de conception d'un architecte.

L'intérêt d'un logiciel de simulation hygrothermique est donc de prendre en compte les variations d'humidité dans les calculs de transferts thermiques. L'humidité impact les propriétés thermiques des matériaux et des pierres, elle influe alors directement sur les résultats obtenus. De plus, WUFI prend en compte la convection et le rayonnement dans les calculs thermiques.

Il est aussi important de présenter les différents éléments présents dans le logiciel.

Le logiciel WUFI nécessite les données suivantes pour pouvoir faire les simulations avec un matériau donné :

- Densité ou masse volumique [kg/m³]
- Porosité [m³/m³]
- Capacité thermique [J/kgK]
- Conductivité thermique (sec) [W/mK]
- Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau [-] (sec)

Néanmoins, pour des simulations bien plus précises et en prenant en compte les propriétés hygrothermiques des matériaux, il faut lui fournir plus de données.

Ces données sont très compliquées à trouver et souvent peu divulguées, encore plus lorsqu'il s'agit d'étudier des matériaux non industriels. Il est donc nécessaire de réaliser une expérience ou de trouver une personne l'ayant déjà réalisé. Pour cette recherche, la majeure partie des données à été tirée de la thèse de PESTRE.

Les données sont les suivantes (s'ajoutant donc aux précédentes) :

- Conductivité thermique saturé en eau [W/mK]
- Teneur en eau volumique [Kg/m³] en fonction de l'humidité relative (valeurs pour HR = 35%, 80%, etc)
- Coefficient de conductivité liquide de sorption et de désorption
- Humidité intérieure à la mise en œuvre
- Facteur de résistance à la vapeur d'eau [-] en fonction de l'humidité relative

Pour déterminer ces valeurs il est parfois nécessaire d'obtenir les suivantes, qui ne sont pas à rentrer dans WUFI pour définir un matériau :

- Teneur en eau massique [%] en fonction de l'humidité relative

De plus, WUFI nécessite un paramétrage de nombreux éléments. Il conviendra de les présenter rapidement afin mettre en avant les éléments pris en compte.

La condition climatique extérieure :

Le logiciel WUFI® propose des données climatiques pour uniquement quelques villes en France. Les villes disponibles sont les suivantes ; Brest, Trappes, Bordeaux, Marseille, Nancy, Grenoble, Marseille, Nice et Feuquières-en-Vimeu (Hauts-de-France).

WUFI propose la possibilité d'ajouter une condition climatique à partir de fichiers de données, le fichier EPW (EnergyPlus Weather) est accepté. Ce type de fichier est rendu publique sur le site {climate.onebuilding.org} et ce pour de nombreuses villes de chaque pays du monde entier. Ce type de fichier (EPW) est aussi utilisé pour les simulations avec EnergyPlus dans Honeybee.

La condition climatique intérieure :

Se baser sur à la fois des réglementations en vigueur en France ainsi que sur la présentation sur la zone de confort faite dans l'état de l'art et donc des chercheurs. Se baser sur la zone de confort adaptative et donc en fonction de la zone climatique suite à une petite étude plus poussée et une présentation détaillée sur la condition climatique de chaque ville.

Orientation solaire du mur :

Possibilité de tester le mur selon sa position face au soleil et alors d'étudier l'impact des radiations solaires sur les transferts hygrothermiques au sein du mur en pierre.

Possibilités : Sud, Sud-Ouest, Ouest, Nord-Ouest, Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est.

Cette variante permet donc de connaître les variations des différentes combinaisons en fonction de l'orientation du mur et donc de proposer des solutions différentes pour ces dernières. Ces différentes solutions pourront alors être essayées ensemble lors de l'étude énergétique à l'échelle d'un bâtiment.

Fruit du mur :

Originellement de 90°, une des méthodes d'optimisation peut être l'inclinaison du mur sur sa face extérieure (provoquant donc une hétérogénéité de l'épaisseur sur toute la hauteur du mur). C'est donc ce qu'on appelle le fruit. Ce fruit vise à maximiser l'impact du rayonnement solaire au contact de la surface extérieure comme pour les vitres ou encore les panneaux solaires. Il est donc important d'étudier cette inclinaison en fonction de celle du soleil selon la condition climatique locale.

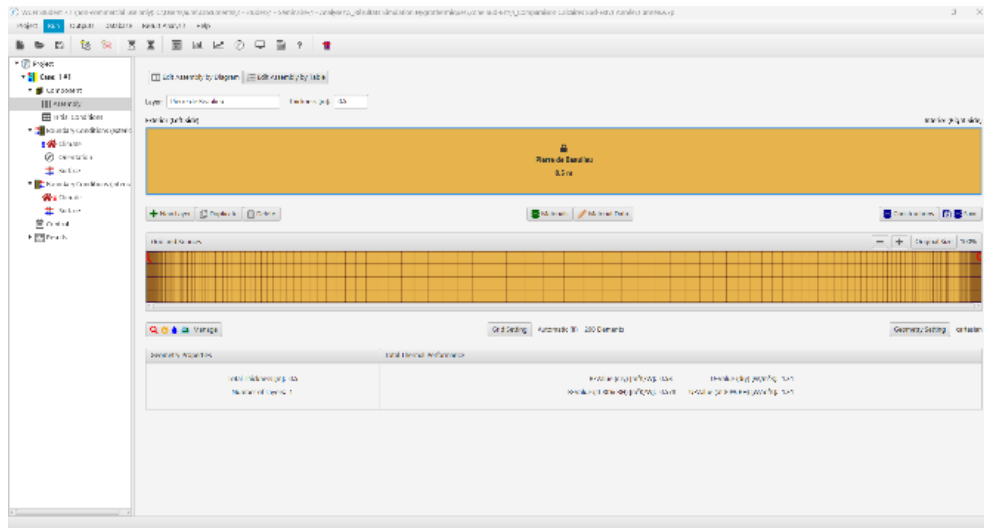


Figure 75 : Gestion des matériaux et épaisseurs composants la paroi (Source : Auteur)

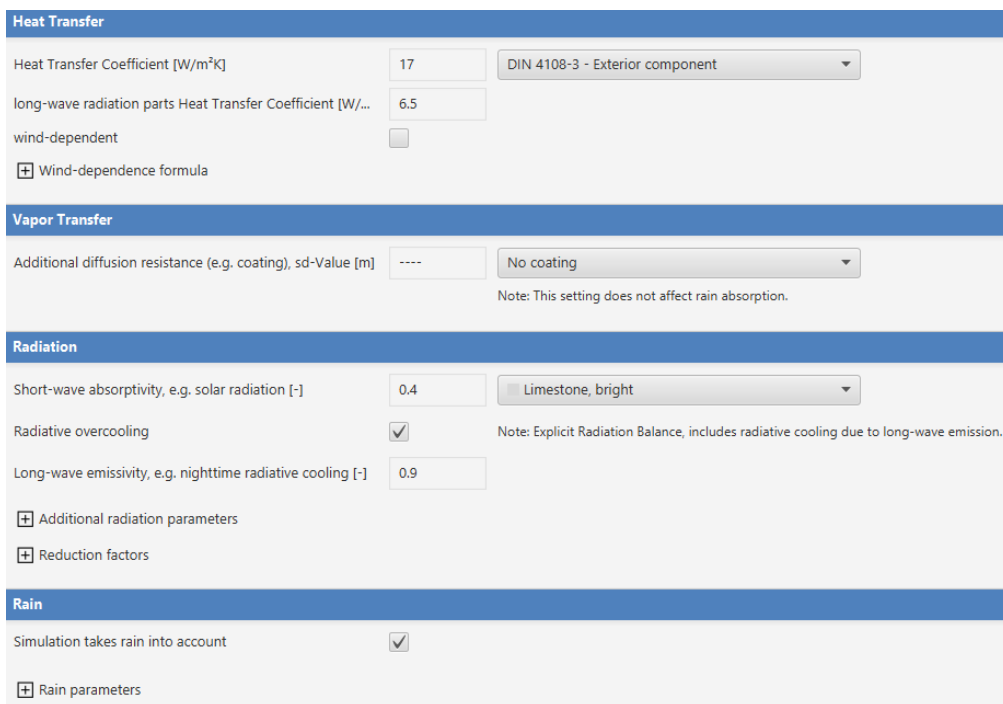


Figure 76 : Interface des WUFI pour les paramètres de la paroi (Source : Auteur)

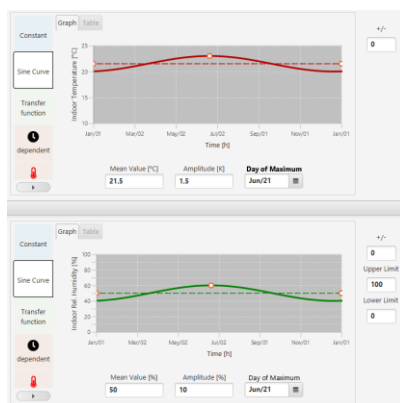


Figure 74 : Paramétrage de la température et humidité de l'air à l'année côté intérieur (Source : Auteur)

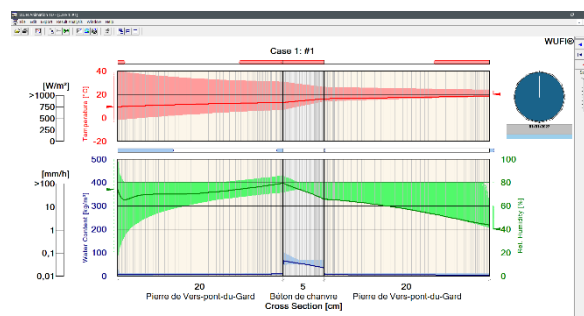


Figure 73 : Visualisation de l'évolution de la température et de l'humidité dans la paroi après la simulation sous format vidéo (Source : Auteur)

4.1.2.2_ Simulation énergétique STD à l'échelle du bâti

4.1.2.2.1 Les logiciels de simulation ...

Les logiciels utilisés pour valider les bilans énergétiques dans le cadre de la RE2020 sont référencés sur un site dédié du gouvernement.¹¹⁷

La liste est la suivante :

- WINDPE3 : OBBC développement
- LICIEL DIAGNOSTICS : LICIEL Environnement
- ANALYSIMMO : Atlibitum
- DPEWIN : Logiciels Perrenoud
- CLIMAWIN 2020 : BBS Slama
- PLEIADES : izuba
- AUDIT EXPERT : Office Expert
- ARGOS : Ithaque
- BATIAUDIT : Logiciels Perrenoud
- CAP RENOV+ : PIA production

Ces logiciels sont pour la plupart destinés à l'audit énergétique uniquement. Ce sont des logiciels de validation utilisés par les bureaux d'études et de contrôle dans les phases finales. Le seul de la liste permettant une intégration plus souple d'un modèle architectural est PLEIADES, compatible avec un modèle SketchUp.

Les logiciels utilisés par les architectes lors de la phase de conception sont donc complètement différents de ceux utilisés lors de la validation du contrôle énergétique.

4.1.2.2.2 Le logiciel Rhino et son extension Grasshopper complété par des plugins

Néanmoins, il existe un logiciel permettant l'intégration de calculs énergétique dans la phase de conception. Rhinocéros et son intégration de plugins dans l'extension attachée au logiciel : Grasshopper. Les plugins ont été présentés précédemment et sont les suivants : Ladybug, HoneyBee et EnergyPlus (Butterfly aussi mais non utilisé dans ce mémoire).

Ladybug :

- Analyse Climatique
- Abilité à voir comment la morphologie des bâtiments sont affectés par le climat

HoneyBee :

- Modélisation énergétique dans un climat

- En rentrant les données suivantes : morphologie, propriétés des matériaux et paramètres de simulation

Ces plugins permettent donc de réaliser des simulations d'une géométrie créée dans Rhino ou dans Grasshopper. L'ensemble des graphiques et visualisations produites sont visibles dans Rhino et même convertibles en élément (lignes, hachures, etc) Rhino pour les personnaliser. La réalisation des scripts pour exécuter ces plugins se fait entièrement dans Grasshopper.

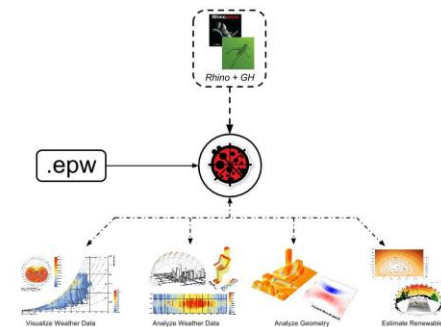


Figure 77 : Utilité de LadyBug (Source : Food4Rhino ; LadyBug Tools)

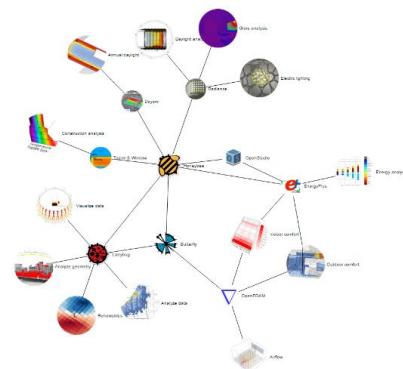


Figure 78 : Plugins compris dans LadyBug Tools (Source : Food4Rhino ; LadyBug Tools)

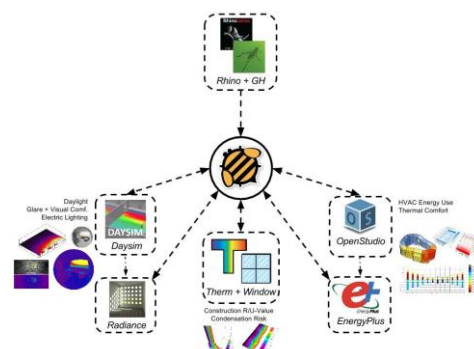


Figure 79 : Utilité de HoneyBee (Source : Food4Rhino ; LadyBug Tools)

¹¹⁷ MINISTÈRE CHARGÉ DU LOGEMENT, 2025. Evaluation des logiciels Audit énergétique réglementaire. RT-RE-bâtiment [en ligne]. 20 mars 2025. [Consulté le 12 octobre 2025]. Disponible à l'adresse : <https://rt-re-batiment.developpement->

4.1.3_ Protocole d'analyse

sur 3 périodes différentes : 1 année, 3j en hiver et 3j en été.

4.1.3.1_ Analyse hygrothermique au niveau de la paroi

Les simulations hygrothermiques des parois en pierre permettent de mesurer différents résultats :

- U (sec)
- R (sec)
- U (80% humidité) (disponible uniquement pour certains matériaux)
- R (80% humidité) (disponible uniquement pour certains matériaux)
- Température en plusieurs points dans la paroi dont la surface extérieure et intérieure
- Identique pour l'humidité
- Courbe d'évolution de la température (ou humidité) dans le temps pour un point donné (intérieur ou extérieur par exemple)
- Courbe d'évolution de la température (ou humidité) dans l'épaisseur de la paroi pour un temps donné

Nos outils de mesure principaux seront les U et R secs ainsi que l'évolution de la température dans le temps pour un point donné (surface intérieure). Les autres résultats pouvant permettre de comprendre et présenter plus en profondeur le comportement hygrothermique d'une pierre.

L'utilisation de la courbe d'évolution de la température dans l'épaisseur de la paroi pour un temps donné pourra permettre la compréhension du comportement de déphasage thermique dans la pierre.

L'étude se faisant par zones, une fois la zone choisie, les données climatiques seront données par une ville références qui en contient. Les paramètres stables de la condition intérieure et extérieure seront alors définis pour l'ensemble des simulations de la zone.

Comparaison des différentes pierres disponibles dans la zone d'étude :

L'étude rapide de l'architecture traditionnelle régionale de la zone permettra de définir un petit corpus de pierres utilisées.

- Comparaison U (sec)
- Comparaison U (sec) avec résistance de convection et de rayonnements
- Comparaison R (sec)
- Comparaison de l'évolution de la température dans le temps pour la surface extérieure et la surface intérieure de chaque type de pierre. Et ce

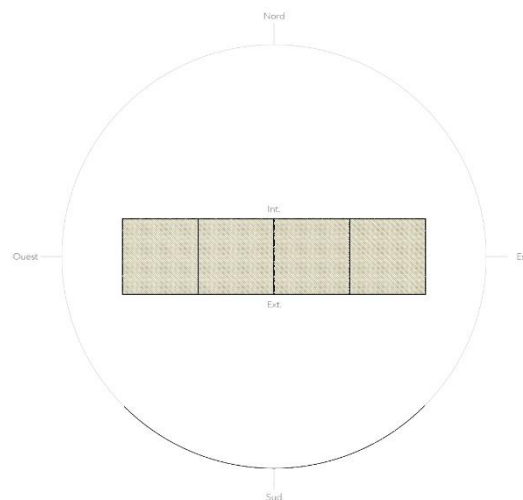
Choix de la pierre la plus performante :

L'analyse des résultats permettra de choisir la pierre la plus performante dans un objectif d'optimisation des performances hygrothermiques. Cette pierre sera utilisée comme donnée non-variable pour la suite des simulations.

Comparaison des différentes orientations de la paroi :

Réalisation des simulations pour 4 orientations différentes de la paroi permettant de notifier l'impact du rayonnement solaire direct sur la température de la surface intérieure. Les orientations simulées sont les suivantes : Sud, Ouest, Nord et Est.

- Comparaison de l'évolution de la température dans le temps pour la surface extérieure et la surface intérieure de chaque orientation. Et ce sur 2 périodes différentes : 3j en hiver et 3j en été.



Comparaison des différentes inclinaisons de mur :

Réalisation des simulations pour 4 inclinaisons du mur pour une orientation au sud. Cette étude permet d'étudier l'impact de l'angle d'incidence entre le rayonnement solaire et la paroi sur la quantité de rayonnements transmis par la pierre vers la surface intérieure. Les inclinaisons simulées sont les suivantes : 90°, 85°, 80°, 75°. L'inclinaison est uniquement celle de la surface extérieure, créant un mur avec du fruit (Figure 80).

- Comparaison de l'évolution de la température dans le temps pour la surface extérieure et la surface intérieure de chaque inclinaison. Et ce sur 2 périodes différentes : 3j en hiver et 3j en été.

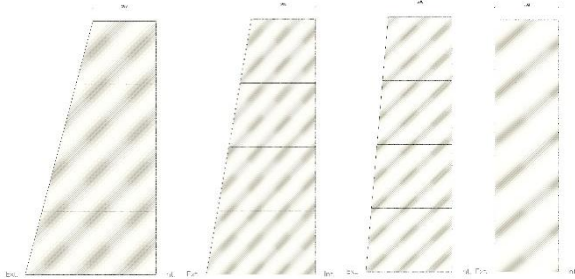


Figure 80 : Différents fruits de la paroi analysés

Comparaison des différentes pierres locales :

L'approfondissement de l'étude vise à pousser la comparaison jusqu'à différentes pierres du même type, celui choisi précédemment. L'objectif est de mesurer l'impact de faibles changements des propriétés des pierres dû aux propriétés dans l'efficacité thermique.

- Comparaison U (sec)
- Comparaison U (sec) avec résistance de convection et de rayonnements
- Comparaison R (sec)
- Comparaison U (humide à 80%) avec résistance de convection et de rayonnements
- Comparaison R (humide à 80%)
- Comparaison de l'évolution de la température dans le temps pour la surface extérieure et la surface intérieure de chaque type de pierre. Et ce sur 3 périodes différentes : 1 année, 3j en hiver et 3j en été.

Choix de la pierre la plus performante :

L'analyse des résultats permettra de choisir la pierre la plus performante dans un objectif d'optimisation des performances hygrothermiques. Cette pierre sera utilisée comme donnée non-variable pour la suite des simulations.

Comparaison de différentes épaisseurs de pierre :

Réalisation des simulations pour le type de pierre choisi à différentes épaisseurs (sans isolant) dans le but d'étudier le déphasage et limite utile entre épaisseur et résultat. Les épaisseurs étudiées seront les suivantes : 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 60cm et 80cm.

- Comparaison U (sec)

- Comparaison U (sec) avec résistance de convection et de rayonnements
- Comparaison R (sec)
- Comparaison U-Value (humide à 80%) avec résistance de convection et de rayonnements
- Comparaison R (humide à 80%)
- Comparaison de l'évolution de la température dans le temps pour la surface extérieure et la surface intérieure de chaque épaisseur de paroi. Et ce sur 3 périodes différentes : 1 année, 3j en hiver et 3j en été.

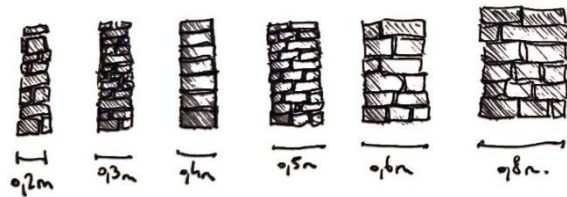


Figure 81 : Différentes épaisseurs de murs de pierres simulées

Comparaison entre les différentes combinaisons de murs à différentes couches :

Cette étape vise à compléter la précédente en ajoutant des combinaisons plus « complexes » afin d'en étudier l'impact sur la température intérieure. Les combinaisons seront les suivantes : pierre/isolant, isolant/pierre, pierre/air ou isolant/ pierre.

- Comparaison U (sec)
- Comparaison U (sec) avec résistance de convection et de rayonnements
- Comparaison R (sec)
- Comparaison U (humide à 80%) avec résistance de convection et de rayonnements
- Comparaison R (humide à 80%)
- Comparaison de l'évolution de la température dans le temps pour la surface extérieure et la surface intérieure de chaque épaisseur de paroi. Et ce sur 3 périodes différentes : 1 année, 3j en hiver et 3j en été.

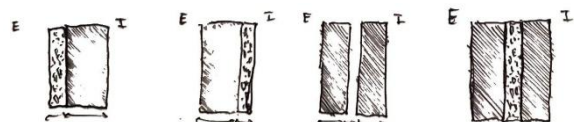


Figure 82 : Combinaisons testées

4.1.3.2_ Simulation énergétique STD à l'échelle du bâti

L'analyse énergétique à l'échelle de la maison se fera en deux phases. La première sera une étude rapide sur le principe de l'approche sol-air présentée en partie 3.1.1 La deuxième sera une analyse du comportement thermique d'une maison en pierre à l'aide d'une simulation thermique dynamique réalisée dans Grasshopper.

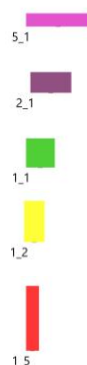
1 - Simulation de l'approche sol-air :

Introduite dans la partie 3.1.1, l'étude sol-air vise à étudier l'impact de la forme sur les déperditions thermiques.

L'analyse sol-air permet ici de comparer le bilan de déperditions et d'apports thermiques entre les 5 façades d'une maison et l'extérieur en considérant à la fois la température et l'ensoleillement extérieur. Cette expérience permet de visualiser rapidement pour une zone précise l'influence de la forme sur les échanges de chaleurs. Le but étant de minimiser les déperditions en hiver et de minimiser les apports en été, dans le but de se rapprocher de 0. Et ce car nous savons que ce sont les objectifs dans un climat tempéré comme la France

Pour cela, différents ratios seront simulés pour une maison d'une surface de 100m². Les dimensions seront donc basées uniquement sur cette surface au sol. L'étude sol-air sera réalisée pour des volumes à 1 et deux niveaux. La surface au sol pour un volume à deux niveaux sera donc 50 m² pour une surface 'habitable' de 100m². La hauteur des niveaux sera de 3m. Les ratios étudiés seront donc les suivants, allant d'une forme étirée Est-Ouest orientée Nord-Sud (5_1) à une forme étirée Nord-Sud orientée Est-Ouest :

- 5_1
- 4_1
- 3_1
- 2_1
- 1.5_1
- 1_1
- 1_1.5
- 1_2
- 1_3
- 1_4
- 1_5



Un script Grasshopper sera réalisé sur la base d'un code utilisé dans un cours suivi à la NTNU.

$$T_{\text{sol-air}} = T_{\text{out}} + I_{\text{sol}} \times \alpha R_{s,e}$$

Avec :

T_{out} = Température extérieure

I_{sol} = Radiation solaire incidente

$R_{s,e}$ = Résistance thermique de l'air en surface extérieure'

α = Coefficient d'absorption solaire

$$Q_{\text{surface}} = A \times U \times \Delta T = A \times U \times (T_{\text{sol-air}} - T_i)$$

Avec :

Q_{surface} = échange de chaleur de la façade

A = Aire de la façade

T_i = Température intérieure

U = Coefficient de déperdition thermique

$$Q_C = Q_{\text{façades}} + Q_{\text{toit}}$$

Le script permettra de calculer $T_{\text{sol-air}}$ en fonction des données EPW utilisées et des valeurs de alpha et Rse suivantes :

- Rse = 0,04
- Alpha = 0,8

Par la suite, en fonction des dimensions des faces des ratios et de $T_{\text{sol-air}}$, Q sera calculé avec les valeurs de U et de T_i suivantes :

- U = 1
- $T_i = 18^\circ\text{C}$

Les simulations sol-air présentent un dernier paramètre, la période à laquelle elle est réalisée représentant l'hiver et l'été. L'approche sol-air faisant référence à l'irradiation solaire et à la température extérieure, il existe un cycle solaire et un cycle de température avec des 'maximums' et 'minimums' différents. Le cycle solaire permet d'étudier les différents ratios lorsque que le soleil est au plus haut dans le ciel (solstice d'été) et au plus bas (solstice d'hiver) ainsi qu'à l'équinoxe (entre deux). Le cycle de température permet de réaliser les simulations lorsque les températures sont (en moyenne) les plus hautes (solstice d'été), les plus basses (solstice d'hiver) et à l'entre deux.

Pour le cycle solaire, les dates auxquelles les simulations sont réalisées sont les suivantes :

- Solstice d'été : 21/06
- Équinoxe : 20/03
- Solstice d'hiver : 21/12

Pour le cycle de température, les dates auxquelles les simulations sont réalisées sont les suivantes :

- Solstice d'été : 31/07
- Équinoxe : 15/04
- Solstice d'hiver : 31/01

Ces simulations permettront de calculer des valeurs de Qc moyen pour chaque forme et pour chaque journée type. Les résultats seront visualisés à l'aide de graphiques comme présentés dans la partie 3.1.1 (Figure 12).

Il y aura donc deux simulations à réaliser pour les deux zones choisies, une avec le cycle solaire et une avec le cycle de température. Ces simulations permettront d'établir une forme optimale théorique pour la suite des expériences.

2 – STD à l'échelle de la maison

Les simulations STD seront réalisées avec un script Grasshopper composé d'éléments du plugin LadyBugTools comme présenté.

L'objectif de ces simulations est de combiner l'ensemble des résultats de l'ensemble des analyses précédentes avec d'autres paramètres afin de mesurer l'impact de ces derniers sur les besoins en chauffage et en refroidissement. De plus, ces simulations permettront de mesurer la quantité des besoins en chauffage et en refroidissement, donnant des valeurs réelles de consommation, comparables avec les objectifs donnés par la RE2020.

Les simulations seront à réaliser dans cet ordre et à légèrement adapter en fonction de la zone étudiée :

- 1) Maison vernaculaire type définie (à venir en partie 4.2.1)
- 2) Meilleurs ratios définis par les résultats des simulations sol-air
- 3) Ratio d'ouverture (fenêtres) par façade
- 4) Types de pierre et principales combinaisons de paroi en pierre étudiées dans les simulations à l'échelle de la paroi
- 5) Type de sol et vide sanitaire, échanges avec le sol pris en compte
- 6) Maison théorique avec pièces basé sur les résultats précédents et une organisation spatiale basée sur les solutions passives présentées dans la partie 3.1.3

- 7) Solutions passives déterminées utiles selon les besoins définis pour chaque zone
- 8) Solutions additionnelles déterminées à l'aide des résultats précédents
- 9) Simulation de la maison vernaculaire avec paramètres choisis pour la maison théorique
- 10) Simulation de la maison théorique définie à la fin dans le climat de l'autre zone

Dans ces simulations, des paramètres seront stables et ne changeront pas, ils seront définis avant les simulations :

- Matériaux et valeurs de U et de R des toitures et planchers intermédiaires (entre étages)
- Programme (nombre d'usager, équipement, éclairage, etc)
- Performances parois vitrées
- Hauteur d'un étage
- Surface habitable (sauf pour vernaculaire)

Parmi les différentes solutions simulées, les choix seront à la fois guidés par les résultats des besoins en chauffage et refroidissement que par les choix de l'architecture vernaculaire en lien avec les solutions passives et l'architecture bioclimatique.

4.2_ Définitions des zones et éléments d'étude

4.2.1_ Une architecture traditionnelle : échelle régionale

Afin de concentrer le reste de ma recherche sur des éléments précis et concrets. Il est primordial de choisir deux architectures vernaculaires qui me permettront de les présenter en détail avant d'en faire une base d'étude pour la suite de la recherche. Suite à la présentation du climat Français, il m'a paru évident de prendre deux zones opposées afin de comprendre la conception en pierre dans deux milieux différents (mais toujours sous un climat tempéré).

Ces deux zones d'études seront donc attachées à un exemple d'architecture traditionnelle locale en pierre. La première est la côte Nord-Ouest de la France avec un modèle de maison nommé la Longère/chaumière, présente en Bretagne, Normandie et Pays de la Loire. La deuxième est la côte Sud-Est de la France avec la maison à patio présente en Provence, Côte d'azur et Occitanie.

A commencer donc par la présentation de la condition climatique de ces zones.

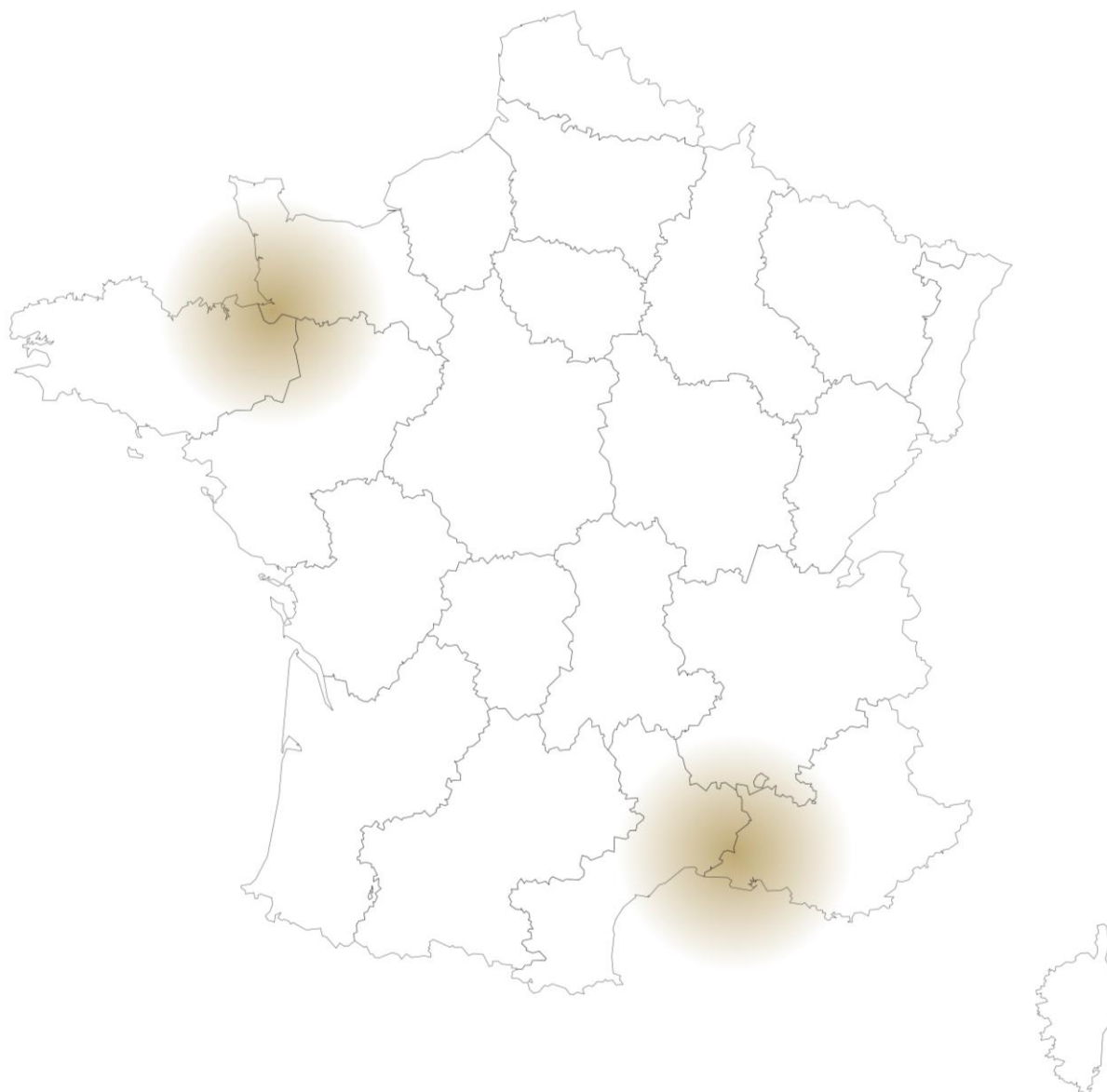


Figure 83 : Positionnement des deux zones d'étude (Source : Auteur)

4.2.1.1_ Nord-Ouest de la France : Rennes

Ce graphique (Figure 85) présente l'évolution de la température ambiante et de l'humidité de l'air sur l'année en regroupant les journées moyennes mensuelles. La ligne centrale équivaut à la moyenne et l'étendue autour les valeurs comprises entre le premier et le troisième quartile, écartant les valeurs exceptionnelles. La température moyenne se retrouve majoritairement en-dessous de la zone de confort et à l'intérieur pendant l'été. Cette dernière est stable au long de la journée en hiver et très variable en été. L'humidité de l'air est très élevée toute l'année (au-dessus de 50%) et varie durant la journée avec l'apparition de la chaleur procurée par les rayonnements solaires. De plus, en complémentarité avec la température et l'humidité, un calcul des heures de chauffages nécessaires pour atteindre la zone de confort est fait pour chaque

mois. Donnant une première idée de l'enjeu architectural. Ici, il est principalement nécessaire de chauffer toute l'année, donnant une estimation à 2260 d'heures de chauffage. Un très faible besoin de refroidissement apparaît pendant les mois d'été estimé à 39 heures. Le graphique psychrométrique (Figure 84) présenté en partie III.I permet de visualiser la condition climatique en un seul document. Il démontre ici une grande concentration des valeurs dans la zone très humide autour de 10 degrés.

La rose des vents (Figure 86) montre de faibles vitesses de vent.

La courbe du soleil présentée dans la Figure 87 présente un soleil haut en été et bas en hiver, respectant un ensoleillement au sud toute l'année.

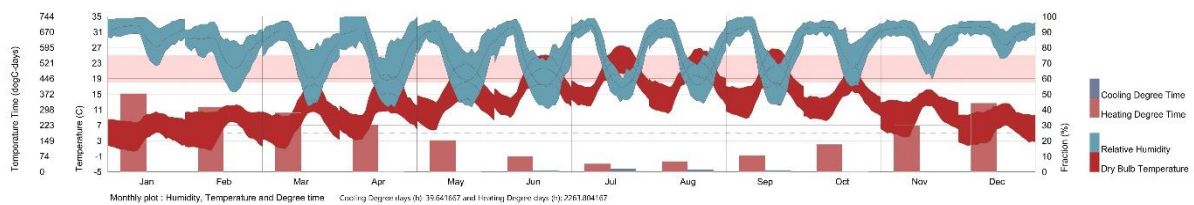


Figure 85 : Moyennes journalières par mois de la température et de l'humidité de l'air à Rennes, Besoin estimé des quantités d'heures de refroidissement et de chauffage (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

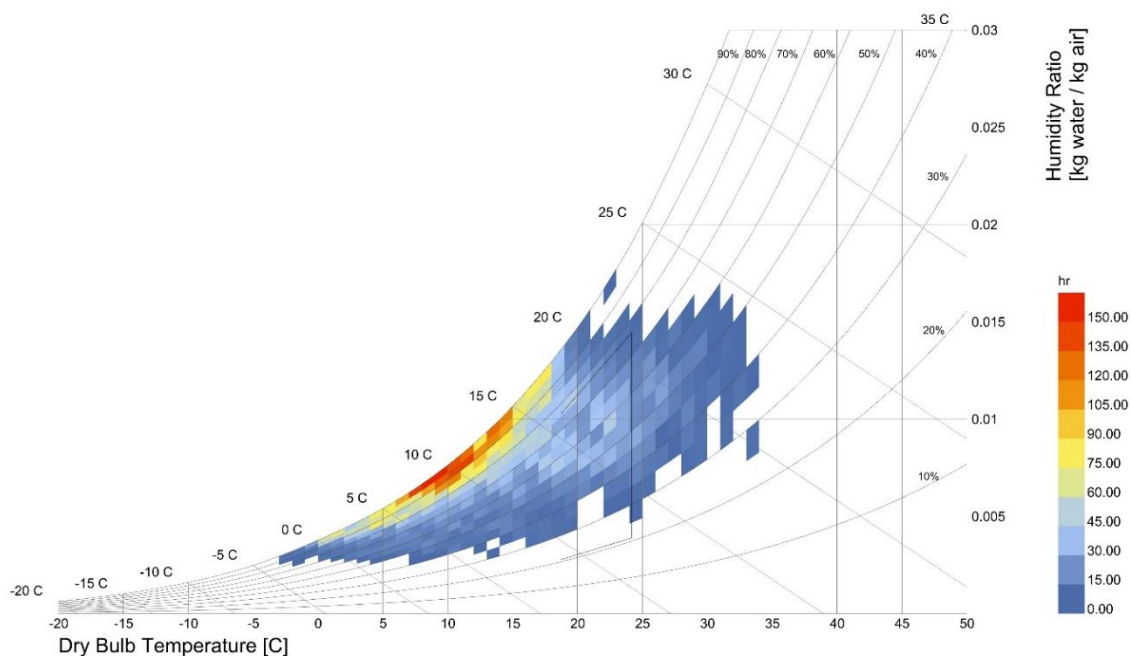


Figure 84 : Graphique Psychrométrique pour la ville de Rennes (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

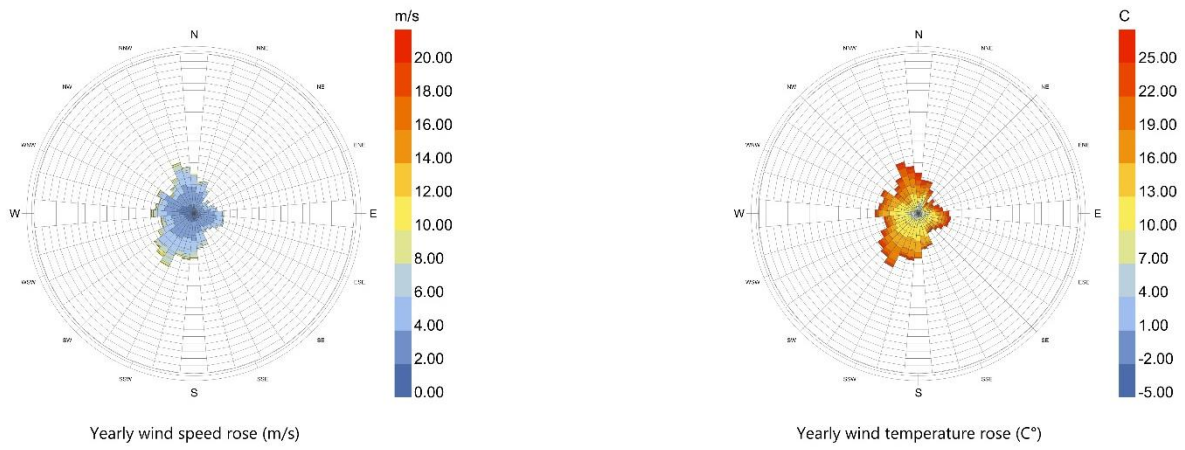


Figure 86 : Rose des vents annuelle selon sa vitesse et sa température de la ville de Rennes (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

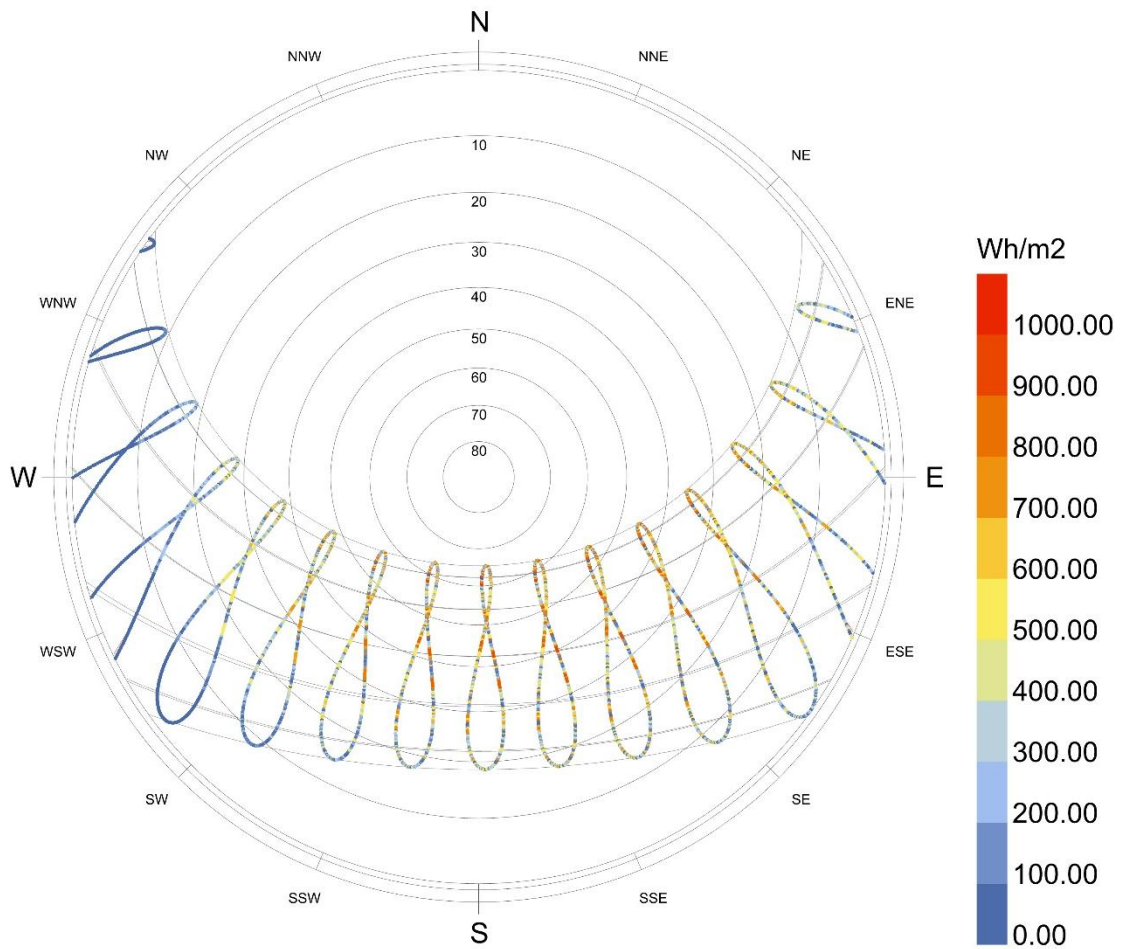


Figure 87 : Course du soleil et radiation solaire de la ville de Rennes (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

On remarque que la quantité d'énergie délivrée par le soleil est plus importante le matin que le soir (plus à l'est qu'à l'ouest).

L'architecture traditionnelle du Nord-Ouest de la France est très variée. Sa localisation aux bords des côtes du pacifique et de la manche l'expose à un climat tempéré plus rude que dans le reste de la France. Les hauts niveaux d'humidités et besoins en chauffage. La côte ouest peut se référer à la Bretagne, à la Basse-Normandie et au Pays de la Loire. Nous recherchons alors une architecture traditionnelle en pierre porteuse.

Notre cas d'étude sera la maison longue que l'on retrouve principalement en Bretagne et Basse-Normandie. Ce type de maison se caractérise par une forme rectangulaire. Le nom de maison longue trompe et ne veut pas forcément dire que la maison à une forme allongée.

Néanmoins elle arbore le plus souvent une forme rectangulaire qui peut fortement s'allonger dû à l'accolement d'un ensemble de pièces voir de maisons. Les variations de ce type de maisons sont nombreuses et il n'existe pas un type à proprement parler.

Nous pouvons tout de même en tirer des idées générales tels que :

- Toujours tournée vers le midi, la façade principale rassemble les ouvertures et les accès.
- Construites avec des pierres locales comme les schistes, grès, granites et parfois en calcaire (surtout en Normandie)

- Pour les toitures, l'ardoise a remplacé le chaume. Utilisation de tuiles plates (normandes)
- La maison est faite d'un toit à deux pans NS, pas de débordement de la toiture

La maison est principalement peu profonde pour maximiser l'ensoleillement à l'intérieur. Nous pouvons donc en concevoir une maison type traditionnelle avec les dimensions suivantes.

Dimensions extérieures :

- Longueur : 15,8m
- Largeur : 6,1m
- Hauteur : 3 à 5m
- Inclinaison du toit : entre 45 et 55°

L'épaisseur des murs est comprise entre 40 et 80cm. Ils sont généralement très épais. Parler de la mise en œuvre du double mur (pierre - remblais terre et chaux - pierre).

- Pierre de taille pour les angles et encadrement en guise de renforcement
- Mur double avec remplissage de tout-venant
- Très peu d'enduits extérieurs sauf pour la pierre de Caen car très effritable (et parois tournées au nord et au Noroît car vents porteurs d'humidité)
- Les pierres locales sont globalement imperméables et appareillage parfait



Figure 88 : Maison en pierre porteuse dans la plaine de Caen, Normandie (Source : MONDIN, 1979)

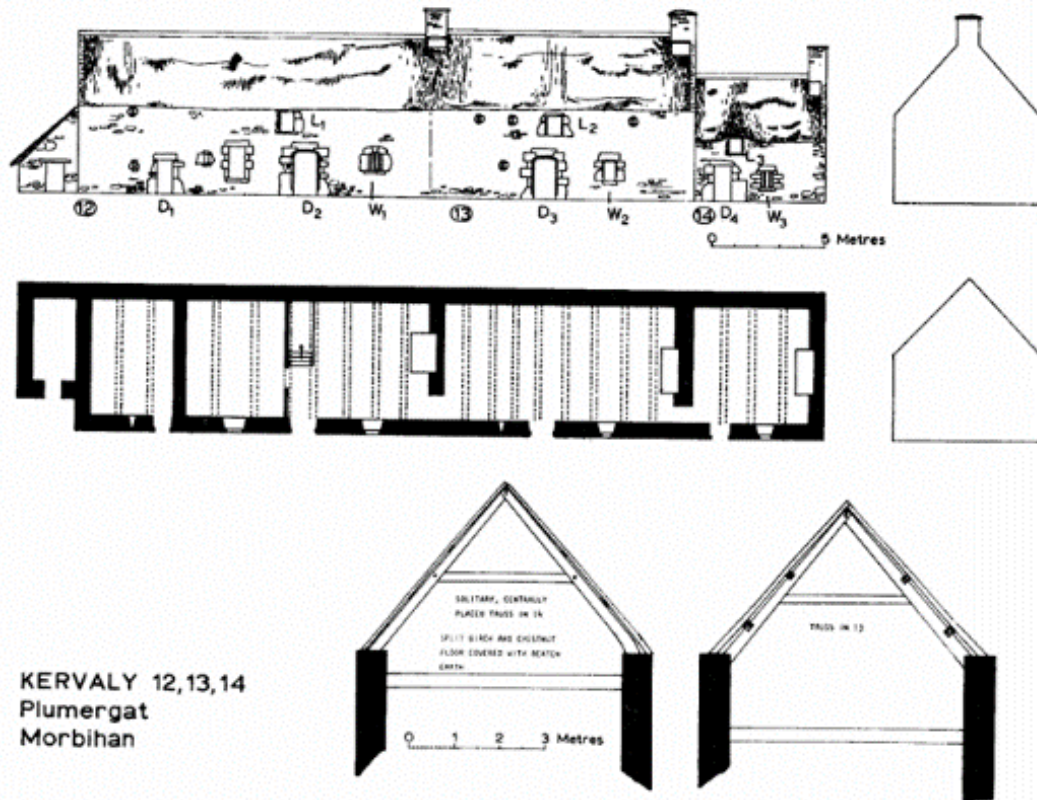


FIGURE 4 a

Figure 89 : Plan de maison longue, assemblage de plusieurs maisons dans le Morbihan, Bretagne (Source : MEIRION-JONES, 1980)

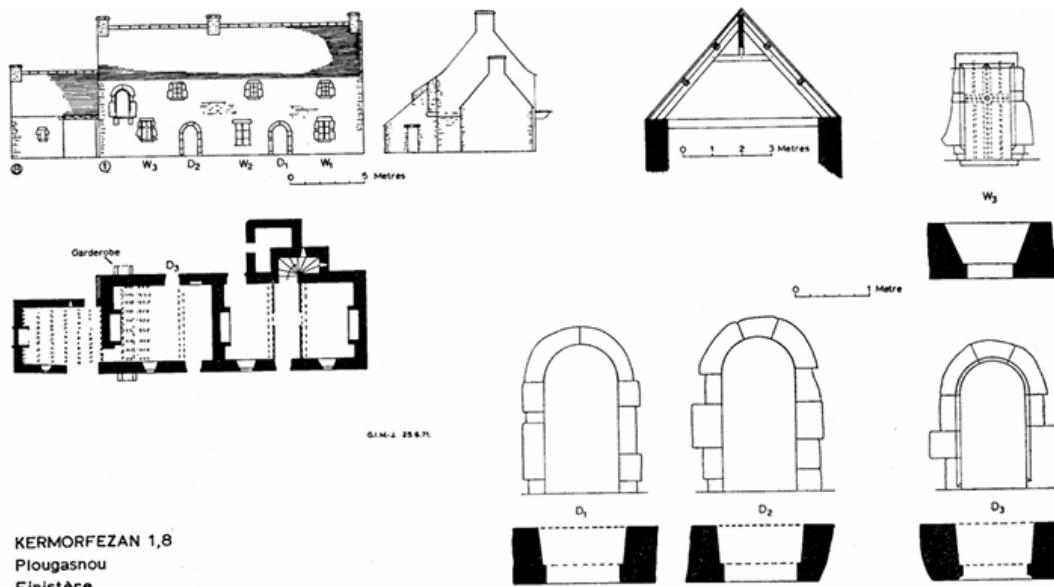


FIGURE 9

Figure 90 : Plan de maison à pièces multiples dans le Finistère, Bretagne (Source : MEIRION-JONES, 1980)

4.2.1.2_ Sud-Ouest de la France : Marseille

Le climat méditerranéen, représenté ici par la ville de Marseille est plus chaud que celui du nord-ouest. Nous le voyons sur la Figure 92 qui montre bien que la température de l'air extérieur est plus ou moins comprise dans la zone de confort la moitié de l'année, en dessous en hiver et légèrement au-dessus en été. La notion de climat tempéré prend plus de sens ici. Dû à un ensoleillement et des températures plus importantes, le taux d'humidité de l'air est légèrement inférieur à celui dans le Nord-ouest mais reste néanmoins presque toujours au-dessus de 50%. Celui-ci varie énormément durant la journée. Les besoins en chauffage et refroidissement sont donc différents de la zone nord-ouest. La quantité d'heure de refroidissement est estimée à 238 heures tandis que pour le chauffage, elle est estimée à 1511 heures. Les

besoins sont donc estivaux avec tout de même un besoin important de chauffage et surtout en hiver.

Pour ce qui est du graphique psychrométrique, on remarque que les valeurs sont bien plus réparties en termes de température et d'humidité. Ceci montre donc une situation changeante et un besoin d'une architecture adaptée aux différentes saisons.

Pour ce qui est de la rose des vents, on remarque une répartition plus claire des vents dominants avec un très puissant mistral venant du Nord-Ouest.

La courbe du soleil est presque la même que dans la zone Nord-ouest, elle est légèrement plus verticale et présente une radiation solaire plus importante et surtout à l'est.

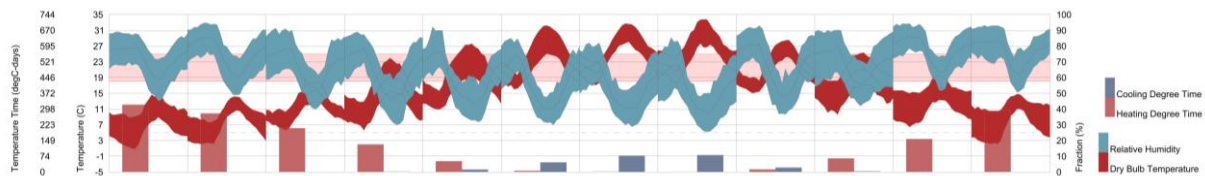
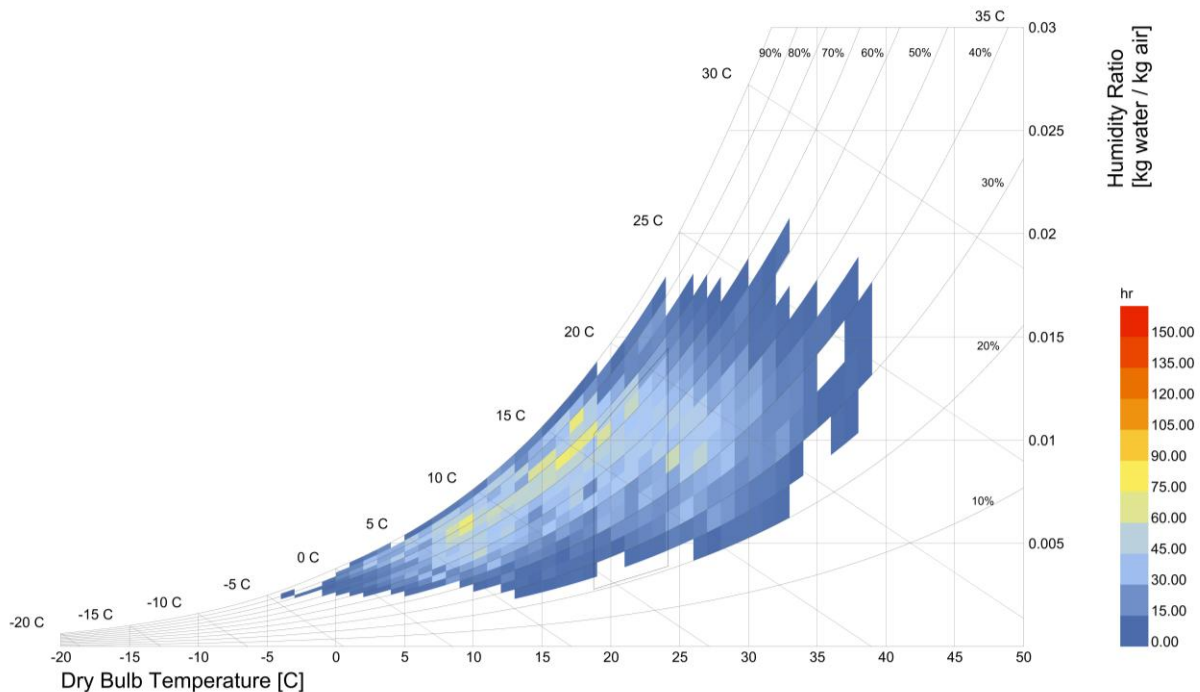


Figure 92 : Moyennes journalières par mois de la température et de l'humidité de l'air à Marseille, Besoin estimé des quantités d'heures de refroidissement et de chauffage (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))



Psychrometric chart of climatic condition in Marseille, France.

Figure 91 : Graphique Psychrométrique pour la ville de Marseille (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

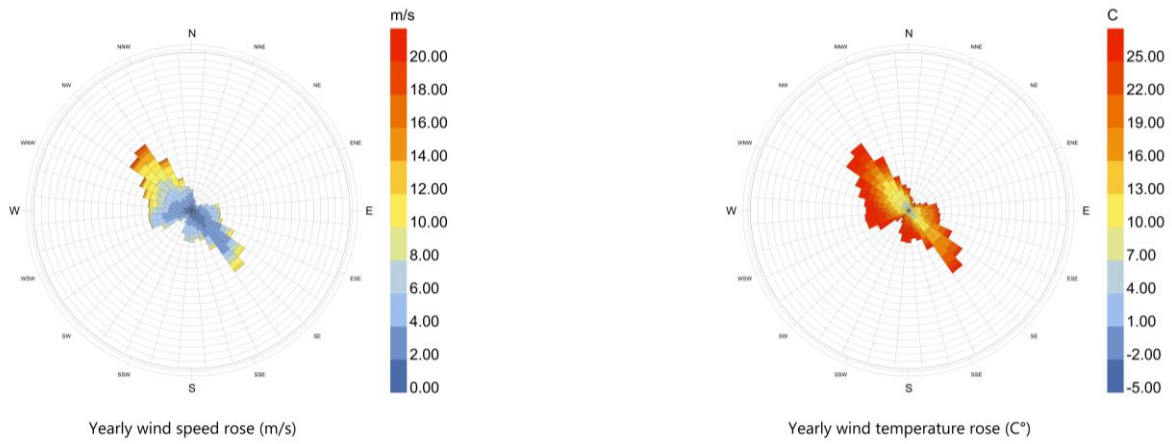
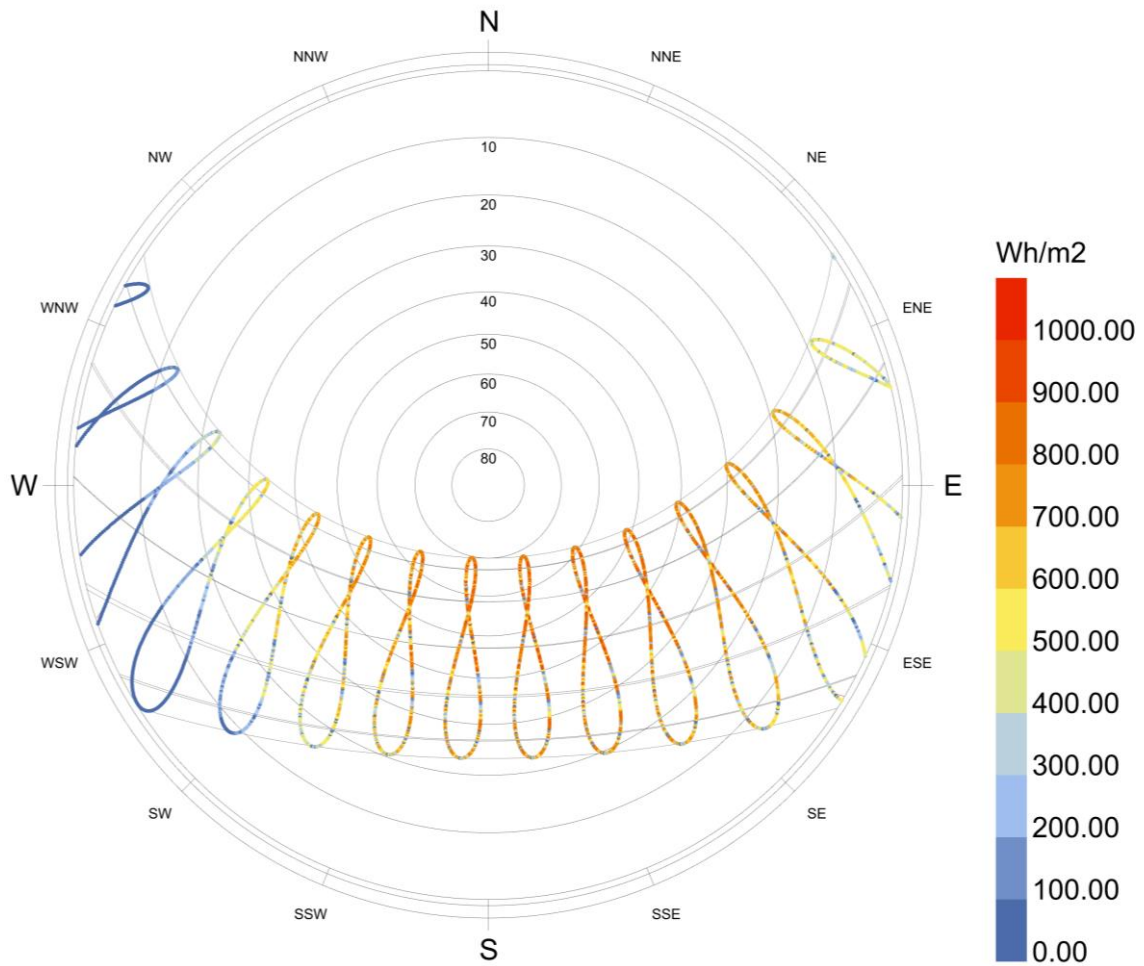


Figure 94 : Rose des vents annuelle selon sa vitesse et sa température de la ville de Marseille (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))



Direct Normal Radiation (Wh/m2)
 city: Marseille.Provence.AP
 country: FRA
 time-zone: 1.0
 source: SRC-TMYx

Figure 93 : Course du soleil et radiation solaire de la ville de Marseille (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

L'architecture traditionnelle du Sud-Est de la France est aussi très variée. Son climat chaud pose une première question permettant de resserrer la zone d'étude de l'habitat vernaculaire. La maison est-elle isolée ou en ville ?

Notre mémoire se concentrant sur la maison individuelle, nous parlerons de la maison isolée de plaine qui représente une faible partie des maisons de cette partie de la France. En Provence, les maisons sont majoritairement faites en pierre et en terre. Les maisons de pierre isolées ont une forme soit cubique soit particulière en cour ou à patio (surtout dans les périodes plus récentes). Les maisons comportent la plupart du temps un étage, et chaque étage possède une grande hauteur sous-plafond. Cette maison est souvent appelée maison cubique axiale.

Nous porterons notre étude sur la maison cubique à étage en pierre. Ce type de maisons comporte quelques variétés différentes. Néanmoins, elle s'éloigne peu de la forme du carré en plan. Les maisons sont tournées vers le midi avec parfois un léger désaxage vers l'est afin de protéger du mistral du nord-ouest ainsi que pour profiter de l'ensoleillement du matin en hiver.

- Grandes lignes de cyprès (végétation), contre la maison côté du couchant, feuillage épais, protège maison et plantations.
- Façade au midi
- Grandes ouvertures au sud, petites au nord, aucune au couchant et levant
- Façade en crépis, toit de tuiles en dos d'âne
- Toit à deux pentes, nord et sud

Dimensions extérieures :

- 11m de long
- 7 mètres de large
- 8m de haut (murs)
- Toit deux pans à faible inclinaison : environ 15°

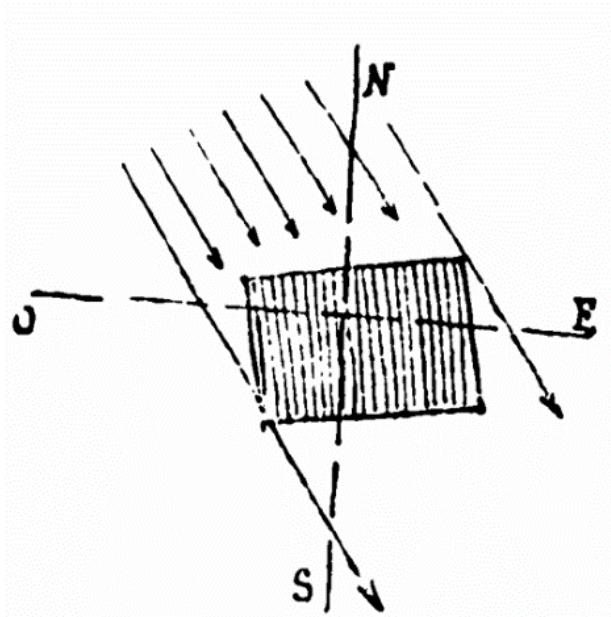


Fig. 1. — Orientation de la maison provençale.

Figure 95 : Orientation de la maison Provençale (Source : FLACH, 1894)

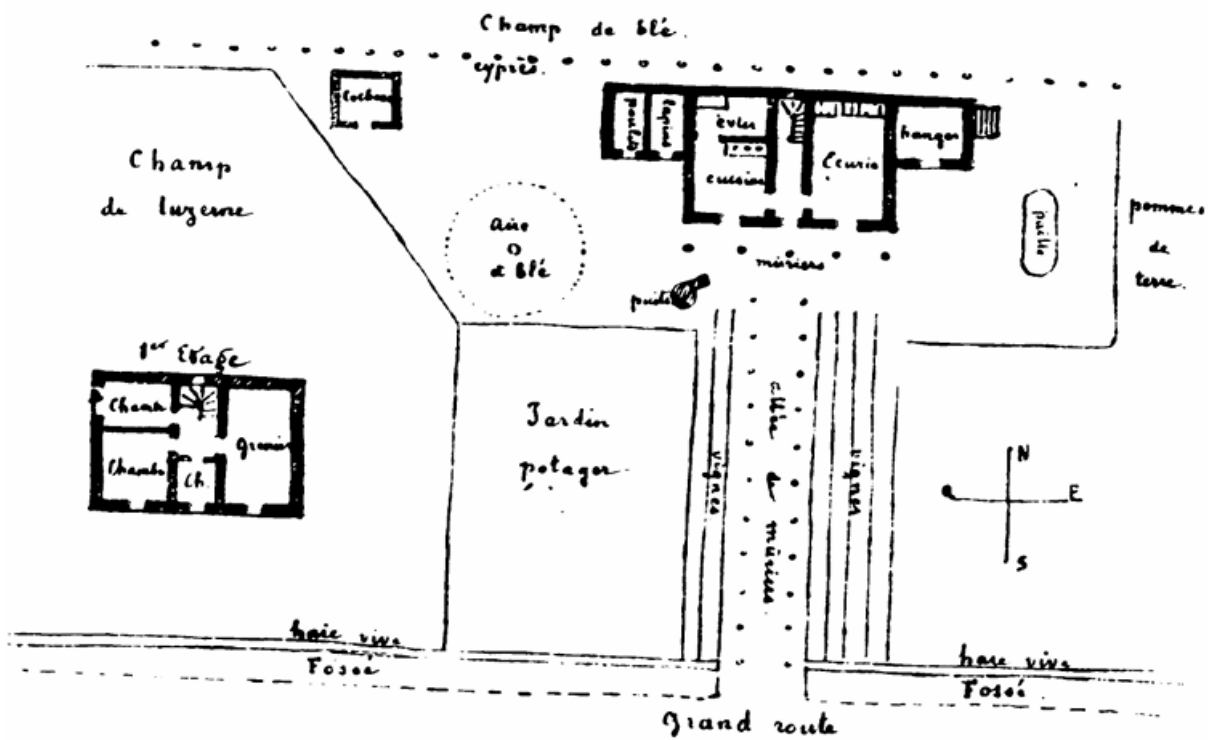


Fig. 2. — Plan d'une maison provençale.

Figure 96 : Plan d'une maison provençale (Source : FLACH, 1894)

4.2.2_ Pierres choisies pour l'analyse

Maintenant que la présentation des architectures traditionnelles types est faite, il est important de resserrer les recherches sur le type de pierre à analyser.

4.2.2.1_ Types de pierres en France

Dans un premier temps, l'analyse portera sur différents types de pierres utilisées pour la construction en France. Bien que les utilisations diffèrent à l'échelle du pays, les analyses dans les deux zones seront réalisées avec les pierres suivantes :

- Granites
- Grès
- Schistes
- Calcaires

	Densité ou masse volumique	Porosité	Capacité thermique massique	Conductivité thermique (sec)	Facteur de résistance à diffusion de l'eau
	kg/m ³	%	J/kg°C	W/m°C	.
Granite	2600	1	1560	2,4	10 000
Grès	2600	15	1560	1,6	30
Schiste	2400	4	1440	1,9	900
Calcaire tendre	1600	25	960	0,92	30

Figure 97 : Tableau des propriétés physiques et thermiques de différentes pierres (Source : Données de RBN, 2013)

Étant donné que les données concernant ces pierres s'arrêtent à celles présentées (Figure 97), il sera compliqué d'avoir des résultats précis et représentatifs de la réalité. En effet, présenté précédemment, WUFI nécessite plusieurs valeurs précises sur les matériaux pour pouvoir réaliser des simulations les plus proches de la réalité. WUFI comporte sa propre base de données, le logiciel étant allemand, il n'y a presque uniquement que des pierres allemandes. Il convient donc de rechercher des pierres françaises avec suffisamment de données permettant l'étude approfondie des transferts hygrothermiques en leur sein

4.2.2.1_ Types de pierres calcaires selon la zone d'étude

Les seules données suffisamment complètes pour réaliser des expériences précises sont celles produites par PESTRE pour sa thèse¹¹⁸, sur des pierres calcaires françaises.

Parmi l'ensemble de pierre qu'il a étudié, 5 seront étudiées dans ce mémoire, par leurs proximités de mes zones d'études ainsi que par leurs bonnes propriétés thermiques :

- Pierre de Noyant
- Pierre de Saint Vaast Fine
- Pierre de Tuffeau
- Pierre de Vers-Pont-du-Gard
- Pierre de Beaulieu

Les pierres de Noyant, de Saint-Vaast-Fine et de Tuffeau seront utilisées pour les simulations dans la zone Nord-Ouest de part leurs localisation géographiques proches. Les pierres de Vers-Pont-du-Gard et de Beaulieu seront utilisées pour les simulations dans la zone Sud-Est, pour les mêmes raisons.

Ces pierres présentent des données fiables déterminées en laboratoire. Dans sa thèse, PESTRE mesure aussi la fiabilité des simulations numériques avec COMSOL présenté précédemment.

¹¹⁸ PESTRE, Tristan, 2021. _La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de

composants d'enveloppes de bâtiments. phd thesis. Université d'Artois.

			Densité ou masse volumique	Porosité	Capacité thermique massique	Conductivité thermique (sec)	Conductivité thermique (saturé en eau)	Facteur de résistance à diffusion de l'eau (sec, 0-50)
			kg/m3	m3/m3	J/kg°C	W/m°C	W/m°C	[-]
Pierre	Rennes	Pierre de Noyant	1761	0,25	718	0,76	1,15	15
		Pierre de Saint Vaast Fine	1520	0,31	739	0,58	1,07	9
		Pierre de Tuffeau	1390	0,33	729	0,56	1,11	9
	Marseille	Pierre de VPDG	1833	0,20	763	0,77	1,17	32
		Pierre de Beaulieu	1842	0,25	737	0,86	1,31	18

Figure 98 : Tableau des valeurs utilisées pour les simulations dans WUFI (Source : Données de PESTRE, 2021)

			Teneur en eau massique (en %) en fonction de l'humidité relative						
			0	0,35	0,5	0,65	0,8	0,9	0,98
Pierre	Rennes	Pierre de Noyant	0	0,2	0,28	0,35	0,53	0,78	1,56
		Pierre de Saint Vaast Fine	0	0,0	0,06	0,07	0,14	0,30	1,61
		Pierre de Tuffeau	0	0,7	1,20	1,90	3,20	4,20	6,30
	Marseille	Pierre de VPDG	0	0,2	0,27	0,36	0,52	0,75	1,38
		Pierre de Beaulieu	0	0,0	0,05	0,06	0,10	0,17	0,73

Figure 99 : Tableau des teneurs en eau massique en fonction du taux d'humidité relative dans la pierre (Source : Données de PESTRE, 2021)

			Teneur en eau volumique (en Kg/m3) en fonction de l'humidité relative						
			0	0,35	0,5	0,65	0,8	0,9	0,98
Pierre	Rennes	Pierre de Noyant	0	3,52	4,93	6,16	9,33	13,74	27,47
		Pierre de Saint Vaast Fine	0	0,61	0,91	1,06	2,13	4,56	24,47
		Pierre de Tuffeau	0	9,73	16,68	26,41	44,48	58,38	87,57
	Marseille	Pierre de VPDG	0	3,48	4,95	6,60	9,53	13,75	25,30
		Pierre de Beaulieu	0	0,74	0,92	1,11	1,84	3,13	13,45

Figure 100 : Tableau des teneurs en eau volumiques en fonction du taux d'humidité relative dans la pierre (Source : Données de PESTRE, 2021)

			facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau [-]								
			0	0,35	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	1
Pierre	Rennes	Pierre de Noyant	26,25	15,30	13,19	11,00	10,16	9,43	9,11	8,93	8,81
		Pierre de Saint Vaast Fine	10,60	8,89	8,31	7,65	7,36	7,09	6,96	6,89	6,84
		Pierre de Tuffeau	20,89	9,57	7,77	6,21	5,64	5,17	4,96	4,84	4,77
	Marseille	Pierre de VPDG	62,93	32,15	26,58	21,59	19,74	18,18	17,49	17,10	16,85
		Pierre de Beaulieu	26,54	18,02	15,84	13,64	12,75	11,98	11,62	11,42	11,29

Figure 101 : Facteur de résistance à la vapeur d'eau en fonction du taux d'humidité relative dans la pierre (Source : Données de PESTRE, 2021)

	Densité ou masse volumique	Porosité	Capacité thermique	Conductivité thermique (sec)	Conductivité thermique (saturé en eau)	Facteur de résistance à diffusion de l'eau
	kg/m3	%	J/kgK	W/mK	W/mK	.
Béton de Chanvre (mur)	420	70	1000	0,1	0,14	4,5

Figure 102 : Tableau des valeurs utilisées pour les simulations dans WUFI pour le béton de chanvre (Source : TRAN LE, 2010 et CERESO, 2005)

5_ Expérimentations et analyses

5.1_ Les transferts hygrothermiques dans un mur en pierre naturelle

- 5.1.1_ Définition des paramètres de simulation
- 5.1.2_ Comparaison entre différentes pierres
- 5.1.3_ Comparaison entre les différentes orientations de la paroi
- 5.1.4_ Comparaison entre différents fruits de la paroi
- 5.1.5_ Comparaison entre différentes pierres calcaires disponibles
- 5.1.6_ Comparaison entre différentes épaisseurs pour une paroi en pierre calcaire
- 5.1.7_ Comparaisons entre différentes combinaisons de parois
- 5.1.8_ Isolation par l'extérieur
- 5.1.9_ Isolation par l'intérieur
- 5.1.10_ Mur double avec cavité d'air
- 5.1.11_ Mur double avec remplissage béton de chanvre
- 5.1.12_ Conclusion

5.2_ Les échanges thermiques dans une maison en pierre naturelle

5.2.1_ Première analyse à l'aide de l'approche sol-air

5.2.2_ Définition des paramètres de simulation des deux zones

5.2.3_ Maison de l'architecture vernaculaire

5.2.4_ Forme : seconde analyse en continuité de l'approche sol-air

5.2.5_ Ouvertures

5.2.6_ Parois verticales

5.2.7_ Protections solaires ouvertures

5.2.8_ Disposition spatiale des pièces

5.2.9_ Solutions passives

5.2.10_ Maison vernaculaire 'améliorée'

5.2.11_ Même maison dans l'autre zone

5.2.12_ Conclusion sur les transferts thermiques dans la maison en pierre naturelle

5.1_ Les transferts hygrothermiques dans un mur en pierre naturelle

Cette partie porte sur les simulations hygrothermiques à l'échelle de la paroi pour un mur en pierre naturelle. Les simulations, réalisées avec WUFI, ont pour objectif de comprendre les échanges de chaleurs et d'humidité dans un mur en pierre. De plus, elles permettent, selon les différents paramètres, de mesurer la température et l'humidité de la surface intérieure, indicateur de confort dans la maison.

Dans un premier temps, la définition des paramètres utilisés pour les deux zones sera présentée. Dans un second temps, les simulations seront présentées et analysées par éléments, et ce, dans les deux zones d'étude. Enfin, une analyse récapitulative, permettra de tirer des conclusions de ces simulations à l'échelle de la paroi.

5.1.1_ Définition des paramètres de simulation

Il est important d'énoncer les paramètres utilisés lors des simulations effectuées à l'aide de WUFI dans cette partie. Je vais donc les présenter pour toute comparaison ou compréhension des résultats nécessaire. Les paramètres suivants resteront inchangés pour l'ensemble des simulations réalisées dans les deux zones d'études.

Paramètres stables et commun aux deux zones

Composant :

La température initiale est de 20°C par défaut.

La condition climatique extérieure :

Utilisation du calcul de charge de pluie pour un petit bâtiment d'une hauteur allant jusqu'à 10m.

La surface est définie comme :

- Transferts thermiques : «DIN 4108-3 – Exterior component», sans dépendance au vent. Coefficient de capacité thermique 17 W/m²K. Coefficient de capacité thermique pour les radiations infrarouges : 6.5 W/m²K.
- Transfert de vapeur : Pas de revêtement
- Radiation : Absorption des radiations d'ondes courtes : 0.4, « Limestone,

Bright », radiation de refroidissement, émissivité des radiation longues ondes : 0.9. Paramètres additionnels standards et sans facteurs de réduction.

- Pluie : prends la pluie en compte, dépendant de l'inclinaison du composant

La condition climatique intérieure :

La surface est définie comme :

- Transferts thermiques: «External Wall (Interior Surface) ». Coefficient de capacité thermique 8 W/m²K.
- Transfert de vapeur : Pas de revêtement

Contrôle des paramètres de simulation :

- Mode de calcul numérique : avec calcul de transfert thermique et d'humidité

Paramètres modifiables et communs aux deux zones

Les éléments modifiables devront être rappelés à chaque simulation afin de pouvoir comprendre les résultats.

Composant :

- Matériau(x)
- Assemblage
- Épaisseur des composants

La condition climatique extérieure :

- Orientation
- Inclinaison

Contrôle des paramètres de simulation :

- Début de la simulation
- Période (heure ou année)

5.1.1.1_ Zone d'étude n°1 : Nord-Ouest

Paramètres stables

Ces paramètres resteront inchangés pour l'ensemble des simulations réalisées dans le climat de la zone d'étude Nord-ouest.

La condition climatique extérieure :

Utilisation du fichier EPW de la ville de Rennes importé dans WUFI.

La condition climatique intérieure :

Selon les données présentées précédemment sur la condition climatique de la ville de Rennes, considéré dans un climat tempéré humide et en zone Csb.

- Température idéale intérieure été : [22°C]
- Température idéale intérieure hiver : [19°C]
- Humidité idéale intérieure été : [70%]
- Humidité idéale intérieure hiver : [50%]

5.1.2.1_ Zone Sud-Est

Paramètres stables

Ces paramètres resteront inchangés pour l'ensemble des simulations réalisées dans le climat de la zone d'étude Sud-Est.

La condition climatique extérieure :

Utilisation des données de EPW de la ville de Marseille.

La condition climatique intérieure :

Selon les données présentées ici sur la condition climatique de la ville de Marseille, considéré dans un climat tempéré humide et en zone Csa.

- Température idéale intérieure été : [23C]
- Température idéale intérieure hiver : [20°C]
- Humidité idéale intérieure été : [60%]
- Humidité idéale intérieure hiver : [40%]

5.1.2_ Comparaison entre différentes pierres

Cette première simulation au niveau de la paroi permet d'étudier la différence entre les différentes pierres utilisées en France. Ces pierres sont les suivantes : le Granite, le Grès, le Schiste et les Calcaires tendres (uniquement les tendres car manque de données pour les calcaires durs).

La Figure 104 présente les valeurs de U et de R pour des pierres de 30cm et 50cm d'épaisseur. On remarque déjà une différence importante entre ces dernières avec le calcaire tendre qui présente un meilleur coefficient de puissance déperditif thermique (le plus bas) et une meilleure résistance au passage de flux de chaleur (le plus élevé).

Ce tableau permet donc simplement de présenter la pierre calcaire comme la plus intéressante d'un point de vue thermique. La Figure 97 présentée précédemment démontrai que néanmoins les autres pierres présentaient d'autres avantages. En effet, la capacité thermique est plus importante pour les autres pierres permettant ainsi un meilleur stockage de la chaleur. Néanmoins, leurs conductivités thermiques sont très élevées, et pour rappel, c'est le paramètre le plus influant dans les échanges de chaleur.

L'ensemble des simulations pour la comparaison des différents types de pierres ont été réalisées avec des épaisseurs de 30cm.

5.1.2.1_ Zone Nord-Ouest

Les simulations sont donc réalisées aux trois échelles de temps dans la zone Nord-Ouest pour les quatre pierres.

Dans un premier temps, la Figure 108 montre que chaque type de pierre permet d'atteindre la zone de confort durant la période estivale. Néanmoins, la température de la surface intérieure reste bien en dessous des 19°C attendus lors de la période hivernale.

La Figure 107 montre que la température en hiver varie très peu à l'échelle d'une journée, avec une légère augmentation de la température en fin de journée. Ceci traduit le temps de réponse de l'élévation de la température extérieure et des radiations solaires. Ceci permet par ailleurs de

	Densité ou masse volumique	Porosité	Capacité thermique massique	Conductivité thermique (sec)	Facteur de résistance à diffusion de l'eau
	kg/m ³	%	J/kg°C	W/m°C	.
Granite	2600	1	1560	2,4	10 000
Grès	2600	15	1560	1,6	30
Schiste	2400	4	1440	1,9	900
Calcaire tendre	1600	25	960	0,92	30

Figure 103 : Tableau des propriétés physiques et thermiques de différentes pierres (Source : Données de RBN, 2013)

	Conductivité thermique (sec)	Coefficient de conductivité thermique (sec)		Résistance à la conduction (sec)	
	W/m°C	W/m ² C		m ² C/W	
Épaisseur (m)		0,3	0,5	0,3	0,5
Granite	2,4	3,45	2,68	0,29	0,37
Grès	1,6	2,84	2,09	0,35	0,48
Schiste	1,9	3,10	2,34	0,32	0,43
Calcaire tendre	0,92	2,04	1,41	0,49	0,71

Figure 104 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

comprendre que les valeurs minimales sont des valeurs de températures que l'on retrouvera en matinée, les minimums que l'on voit ici arrivent vers la fin de matinée. De plus, la Figure 108 montre que les températures intérieures minimales évoluent fortement à l'échelle de plusieurs mois.

La pierre calcaire est celle qui présente les températures les plus élevées en hiver. En effet la différence avec les autres pierres est très importante. Cette différence se traduit alors par une température minimale à l'année de 13,95°C pour la pierre de calcaire tendre et d'environ 12°C pour les autres. Cette différence est dû aux conductivités thermiques, les transferts se font plus que majoritairement par conduction en hiver car l'ensoleillement est faible en hiver dans cette zone.

Par ailleurs, la température maximale la plus faible devrait être celle de la pierre calcaire, pourtant ce n'est pas ce qui est démontré par la Figure 105. Les températures maximales oscillent à 1°C de différence, ce qui reste relativement faible. La pierre calcaire se retrouve alors à moins bien isoler en été que le grès. Cela peut s'expliquer avec la différence de capacité thermique.

	Surface Extérieure		Granite		Grès		Schiste		Calcaire Tendre	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	3,63	25,08	11,65	48,39	12,80	50,82	12,21	49,12	13,95	52,19
Maximale	31,01	100,00	23,32	84,53	22,82	80,00	23,25	81,45	23,16	80,00

Figure 105 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différents types de pierre analysés à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

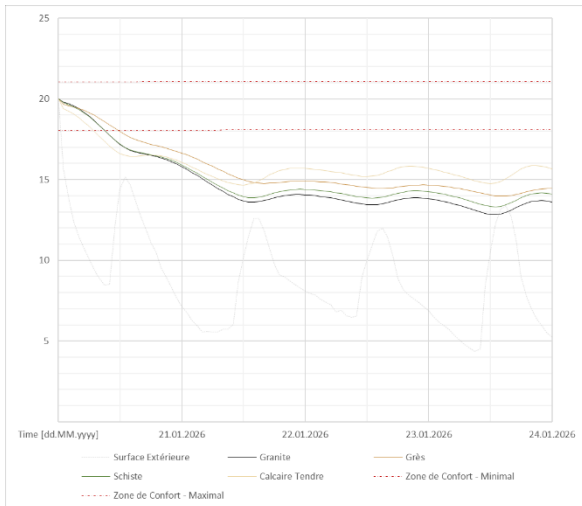


Figure 107 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

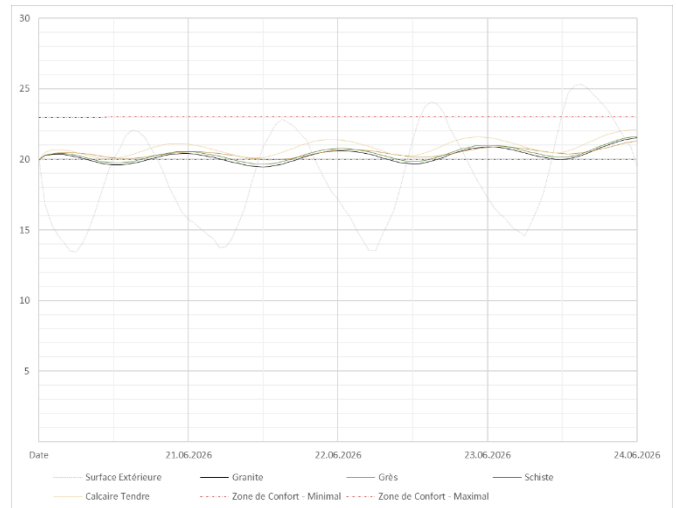


Figure 109 : Évolution de la température de surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

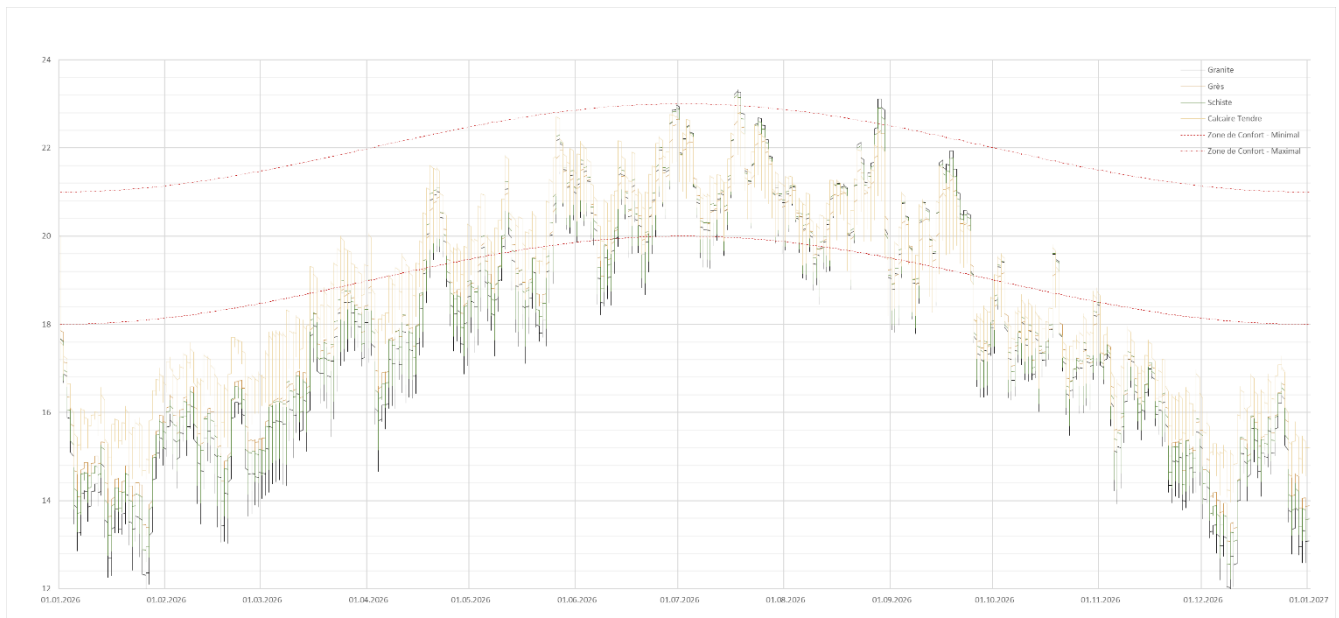


Figure 106 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

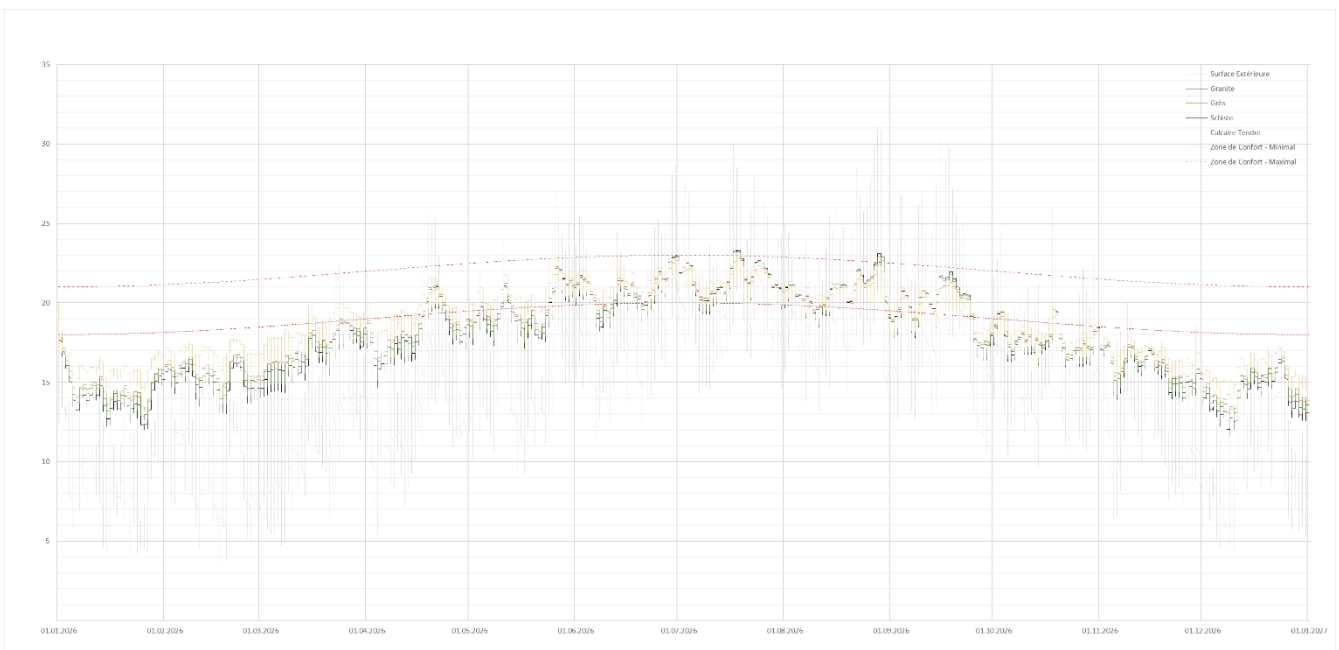


Figure 108 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

En effet, durant l'été, le surplus de chaleur à l'intérieur doit être stocké dans la paroi, plus la capacité thermique de cette dernière est importante, plus de chaleur est stockée. En été, une forte capacité thermique permet de compenser une faible conductivité thermique, et ce, lorsque la température extérieure avoisine la zone de confort et que l'ensoleillement est important.

La Figure 109 le montre par ailleurs. Ce graphique démontre la capacité de la pierre à moduler le climat extérieur pour en diminuer les variations. La température oscille alors faiblement entre nuit et jour, suivant le temps de réponse de la température et de l'irradiation extérieure. Le temps de réponse permet ici de transmettre la chaleur obtenue lors de la journée en fin de soirée. En revanche, le moment le plus frais de la journée apparaît en fin de matinée. Ce temps de réponse n'est visiblement que très peu caractéristique du type de pierre. Nous verrons par la suite s'il dépend de l'épaisseur ou de l'orientation de la paroi en pierre.

Les graphiques présentés de l'Annexe 6 à l'Annexe 10 montrent plus en détail les évolutions de la température de la paroi à l'échelle de la journée (sur 96h). Ils permettent une lecture plus précise des variations de température de la surface intérieure de la paroi.

Pour la gestion de l'humidité aussi montrée par les graphiques en annexe, la paroi en pierre permet de réduire les variations extérieures, et ce, sur toute l'année. Il y a très peu de différence entre les types de pierre bien que la pierre calcaire permette, au même titre que pour la température, une meilleure gestion de l'humidité en comparaison aux autres types de pierre. L'humidité est comprise dans la zone de confort définie en été mais pas en hiver.

5.1.2.2_ Zone Sud-Est

Les simulations sont donc réalisées à l'identique dans la zone Sud-Est avec les paramètres définis précédemment.

Dans un premier temps, la Figure 114 montre que la température de surface intérieure est comprise dans la zone de confort durant les inter-saisons, qu'elle est en dessous en hiver et légèrement au-dessus en été. Bien que la zone de confort change dans cette zone, car le climat est légèrement différent que précédemment, la température de la surface intérieure atteint des températures

importantes en été, au-delà de cette zone de confort. Ceci, peu importe le type de pierre.

En effet, la Figure 110 montre que les températures maximales oscillent entre 25,3 et 26,5°C alors que la température de surface maximale a été délimitée à 24°C. Cette fois-ci la température maximale la plus faible est celle de la pierre Calcaire Tendre. Les transferts thermiques dans cette zone de l'intérieur vers l'extérieur doivent majoritairement se faire par conduction dû aux températures de l'air importantes dans le sud de la France durant la période estivale. Les températures minimales sont très éloignées entre les différentes pierres avec une différence de 3°C entre le Granite et le Calcaire Tendre. Le Calcaire tendre étant la plus isolante, permet une température de surface intéressante (15,8°C) pour seulement 30cm de pierre.

La Figure 111 et la Figure 112 montrent la même chose que précédemment mais avec des variations légèrement plus importantes. L'ensoleillement en hiver et les différences de températures en journée permette un échauffement de la paroi et donc un temps de réponse avec un pic de température en soirée. Voulant dire que la température minimale est atteinte la nuit lors d'une période non ensoleillée. Ce qui n'est pas le cas dans la zone Nord-Ouest.

Les comportements des différentes parois en pierre différent donc fortement en hiver, presque pas en mi-saison et légèrement en été.

Les graphiques présentés de l'Annexe 11 à l'Annexe 15 permettent aussi de mettre en avant les variations de température à l'échelle de la journée.

Pour la gestion de l'humidité, une paroi en pierre de 30cm permet presque de rentrer la zone de confort. En effet, durant la période estivale, toutes les périodes présentent une humidité de surface intérieure dans la zone de confort, tandis qu'en hiver, la pierre calcaire le permet presque. Les différences en gestion d'humidité des différentes pierres sont proches. Néanmoins, les données rentrées dans le logiciel sont peu nombreuses et ne permettent pas de correctement représenter la réalité pour ces pierres.

De l'ensemble de ces simulations, il apparaît que pour les deux zones, la pierre la plus intéressante est la pierre Calcaire tendre, au vu de ses propriétés thermiques.

	Surface Extérieure		Granite		Grès		Schiste		Calcaire Tendre	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-0,28	17,71	13,74	40,48	15,01	42,28	14,30	40,86	15,82	41,35
Maximale	39,14	98,80	26,55	80,00	25,74	80,00	26,22	80,00	25,33	80,00

Figure 110 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différents types de pierre analysés à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

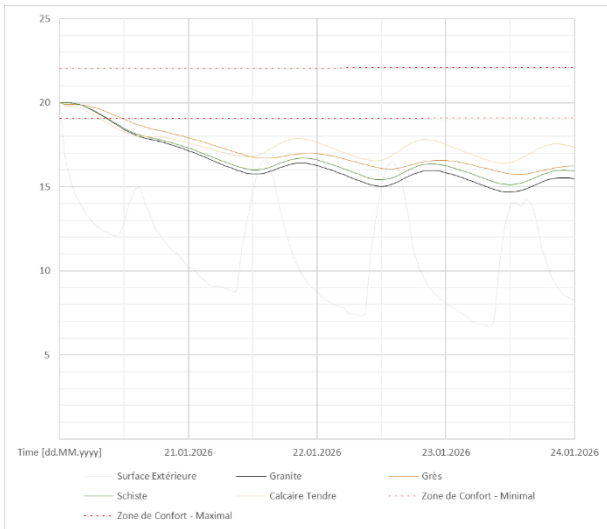


Figure 111 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

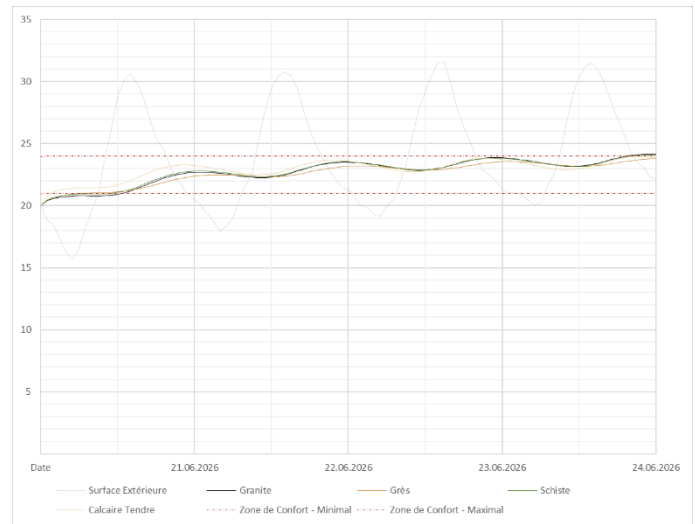


Figure 112 : Évolution de la température de surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

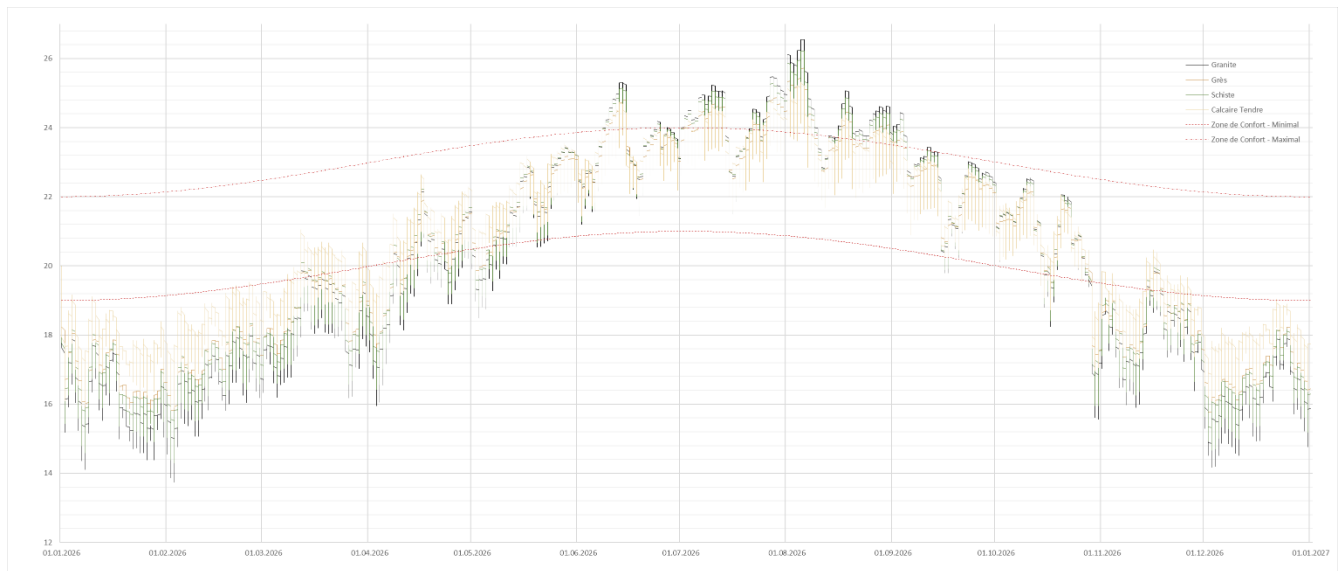


Figure 113 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

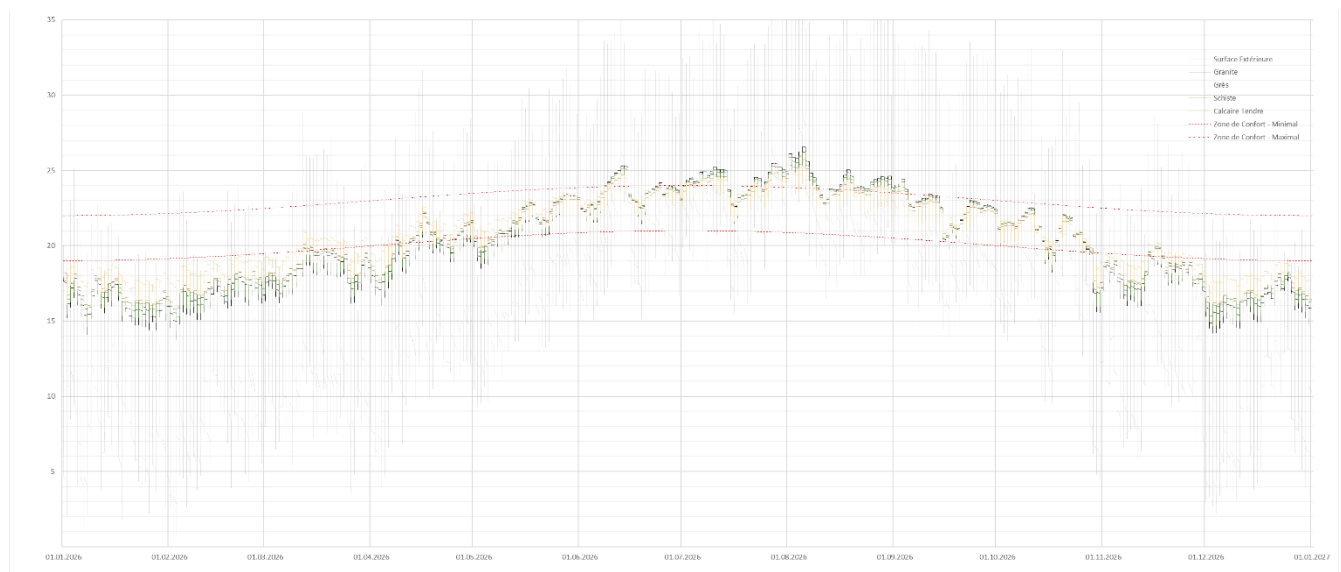


Figure 114 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

5.1.3_ Comparaison entre les différentes orientations de la paroi

Cette simulation permet de comparer les températures de la surface intérieure de murs en pierre calcaire (tendre) de 50cm d'épaisseur. Le but étant de comprendre si l'orientation et donc l'irradiation solaire ont un impact important sur les transferts de chaleur vers l'intérieur pour une pierre d'épaisseur identique, et ce sans isolation.

Les simulations auront donc pour but de comparer la température de surface intérieure pour une paroi au Sud, à l'Ouest, au Nord et à l'Est.

5.1.3.1_ Zone Nord-Ouest

Les simulations sont donc réalisées aux trois échelles de temps dans la zone Nord-Ouest pour les quatre orientations.

Dans un premier temps, il est donc important d'observer l'évolution de la température extérieure sur 96h en été et en hiver.

En hiver (Figure 116), le soleil étant plus bas et les radiations solaires moins importantes et uniquement au sud, la température de la surface extérieure sud est bien plus importante que les autres. Le fait que la température de la face exposée à l'Est s'élève le matin et celle exposée à l'Ouest l'après-midi, démontre bien l'impact du rayonnement solaire sur la température de la surface extérieure. Comme présenté dans la partie 3.2.3, cette dernière évolue en surface. Mais, se transmet-elle jusqu'à la surface intérieure ?

En été (Figure 119), la température de surface extérieure suit le même cycle, à l'Est le matin, au Sud le midi et à l'Ouest l'après-midi. En revanche, la température de la surface extérieure est plus importante à l'Est et à l'Ouest à leurs maximums qu'au Sud.

Il est alors intéressant de remarquer que peu importe l'orientation, pour une épaisseur de 50cm, la température est presque linéaire (en comparaison au 30cm de pierre calcaire vu précédemment) au dépend de la température extérieure.

En hiver, la température entre les différentes orientations est presque inexistante. La Figure 116 et la Figure 117 montrent en effet que la différence est faible, néanmoins, après plusieurs jours ensoleillés en hiver, la différence peut se faire et

aller jusqu'à un demi-degré, comme il semble être le cas début mars (Figure 117). Néanmoins, la Figure 115 montre bien, que les températures minimales sont similaires, sûrement atteinte lors de la situation la plus défavorable, en hiver sans ensoleillement. Cette dernière est cette fois d'environ 16°C.

Alors, au vu du temps de réponse un peu plus important pour un mur de 50cm de pierre calcaire, un ensoleillement prolongé provoque une lente hausse de la température à l'intérieur.

La Figure 119 le montre bien, la température extérieure à l'ouest semble être la plus élevée sur les 96h, résultant en une température intérieure tendant à être plus importante. A l'année, la température maximale de la surface extérieure atteint presque les 37°C pour la surface exposée au sud, et 35°C pour les surfaces exposées à l'est et à l'ouest. En revanche, la température intérieure maximale est relativement proche peu importe l'orientation, environ 22,5°C. Et pourtant, la température de surface extérieure maximale au Nord n'est que de 29,25°C.

Cela démontre bien que l'élément important le plus important reste la température de l'air ambiant extérieur (alors indépendant de l'orientation). Mais que sur une période prolongée, le rayonnement solaire peut induire une augmentation de la température de la surface intérieure.

A l'année, la Figure 118 montre bien que la température de la surface intérieure est dans la zone de confort de début mai à fin septembre, elle reste inférieure à 18°C pendant la période hivernale. Il est par ailleurs intéressant de comprendre que le lissage de la température extérieure se fait bien à l'échelle d'une année pour une épaisseur de 50cm de pierre de calcaire tendre, créant de très faibles variations à l'échelle de plusieurs jours, toujours fonction de la température extérieure.

La Figure 117 le montre mieux, les variations se font à l'échelle de la semaine. L'important temps de réponse, permet alors de lisser la température extérieure. La présentation des propriétés faite en partie 3.2.3 est alors bien démontrée. Néanmoins, cette épaisseur de pierre ne permet pas à elle seule d'atteindre une température de surface intérieure minimale, considérée à 18°C (pour une température de l'air intérieur à 19°C ici).

	Surface Ext. Sud		Surface Ext. Ouest		Surface Ext. Nord		Surface Ext. Est		Sud		Ouest		Nord		Est	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-0,72	19,92	-1,14	22,79	-1,30	34,14	-1,09	18,79	16,19	50,40	16,07	50,40	15,98	50,40	16,09	50,40
Maximale	36,54	100,00	34,60	100,00	29,25	100,00	34,95	100,00	22,43	76,73	22,35	76,84	22,15	77,64	22,64	76,45

Figure 115 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes orientations de la paroi analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

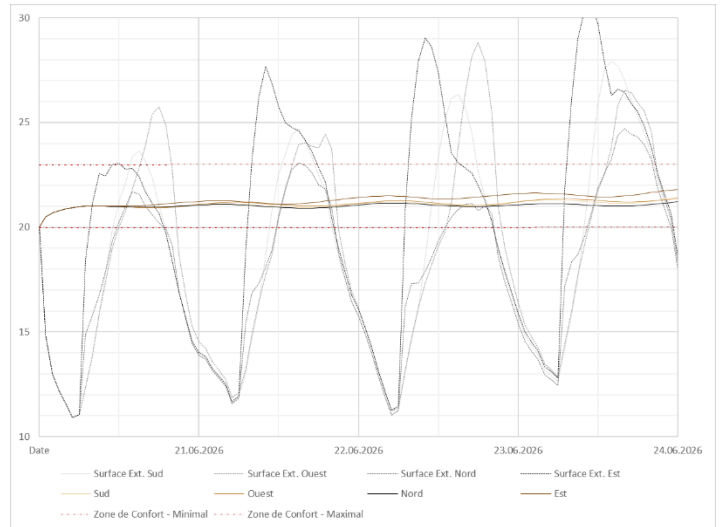
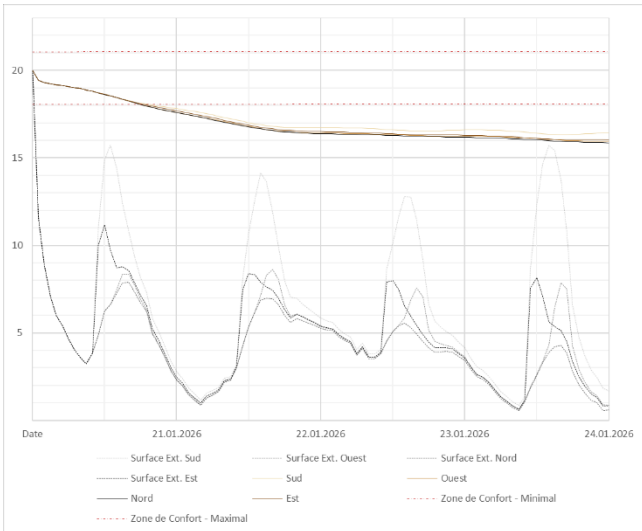


Figure 116 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

Figure 119 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

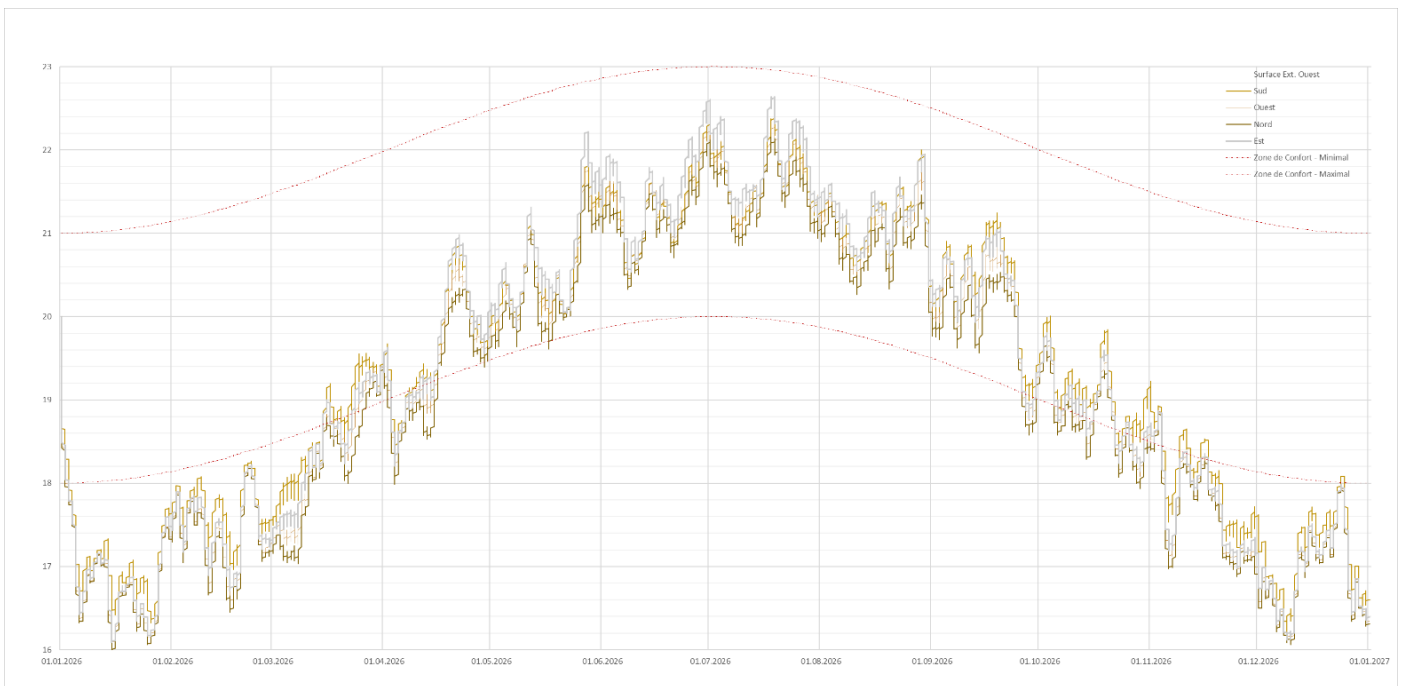


Figure 117 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

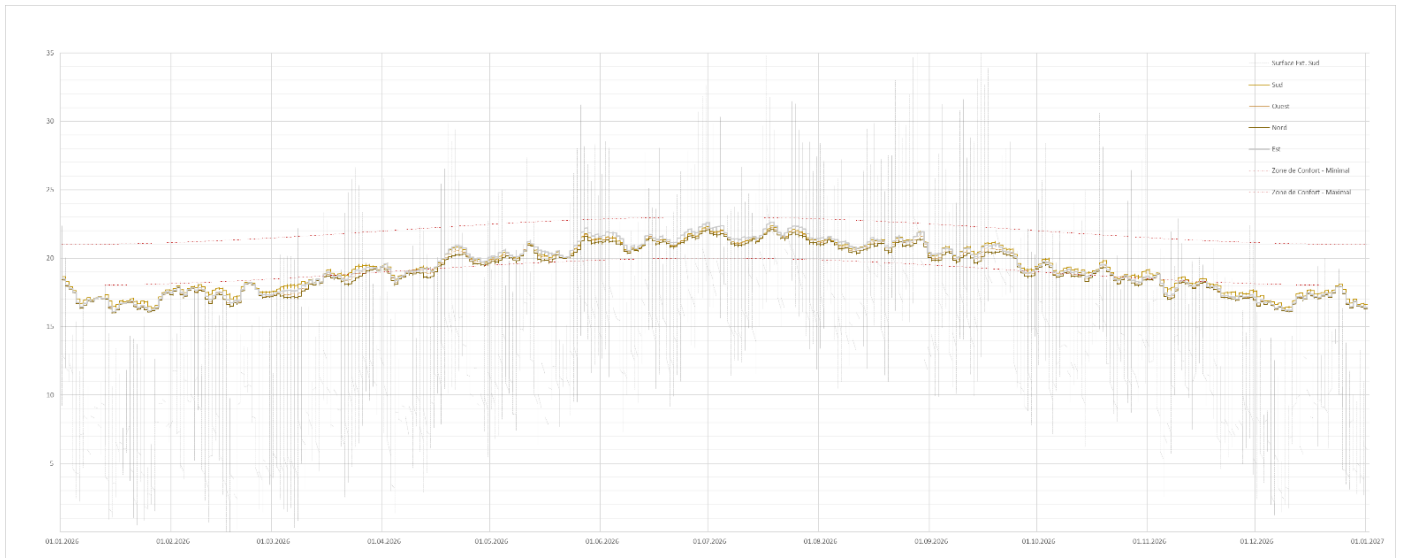


Figure 118 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

Les graphiques présentés de l'Annexe 16 à l'Annexe 20 montrent que la température évolue de l'ordre d'un demi-degré à l'échelle d'une journée durant l'été et est linéaire en hiver. Le graphique présentant l'évolution plus précises en été montre que la température de surface intérieure est plus élevée à l'Est d'un demi degré.

De plus, ces graphiques permettent de visualiser l'évolution de l'humidité intérieure, qui est quasiment dans la zone de confort pour l'année entière. Les données d'entrée n'étant pas plus précises que précédemment, il conviendra de ne pas tenir compte de ces résultats comme étant réalistes.

5.1.3.2_ Zone Sud-Est

Les simulations sont réalisées de manière identique pour la zone Sud-Est.

Dans un premier temps, il est donc important d'observer l'évolution de la température extérieure sur 96h en été et en hiver.

En hiver, les variations de températures de la surface extérieure varient similairement aux simulations précédentes. En revanche, la température au Sud évolue fortement durant la journée jusqu'à atteindre la zone de confort. Cette forte différence de température avec les autres orientations n'induit qu'une faible différence de température de surface intérieure d'un demi-degré.

En effet, la température maximale extérieure sur 96h en hiver est de 19°C au sud contre 11°C au Nord, 13°C à l'Est et 12°C à l'Ouest. Pourtant, sur cette même période en hiver, la température maximale de la surface intérieure est presque similaire au Nord, à l'Est et à l'Ouest (environ 17,5°C) et 0,5°C plus élevée au Sud (environ 18°C).

Cette différence tend à s'accroître suite à un prolongement de journée ensoleillée.

En été, les températures de surfaces extérieures (Figure 124) suivent aussi les mêmes variations que pour la zone Nord-Ouest dû à la course du soleil. En revanche, l'ensoleillement étant plus important et la température extérieure aussi, la température de surface extérieure est très élevée. Ces dernières dépassent les 30°C, sauf pour la paroi orientée Nord.

La Figure 120 montre que la température de surface extérieure maximale est la plus élevée à

l'Est avec 40,7°C, très élevée au Sud avec 39,4°C et à l'Ouest avec 39,9°C contre 33,8°C au Nord. Finalement, l'orientation au Sud n'est pas prédominante selon l'ensoleillement, elle l'est même légèrement moins face à l'Est et à l'Ouest. Seule la paroi orientée au Nord possède une température de surface extérieure plus faible.

Toutes ces différences induisent de faibles changements pour les différences de températures de surface intérieure. Les températures maximales oscillent entre 23,8 et 24,4°C, soit environ 15°C de moins que la température de surface extérieure. Ces valeurs sont peu influencées par l'orientation.

Pour les températures de surface intérieure minimales, il en est de même avec des valeurs entre 17°C et 17,6°C, la valeur au sud étant la plus élevée, dû à la différence d'ensoleillement significative durant la période hivernale.

Pour cette épaisseur et dans cette zone, l'orientation est encore moins sujette à des différences entre les températures de surface intérieures. La Figure 121 montre que la température de surface intérieure est presque comprise dans la zone de confort définie. Elle l'est entièrement en été et légèrement en dessous en hiver, d'environ 1°C en moyenne avec des valeurs chutant à 2°C en dessous durant les semaines froides et la nuit.

Les graphiques présentés de l'Annexe 21 à l'Annexe 25 montrent que l'humidité de surface intérieure est entièrement comprise dans la zone de confort. Cependant, comme pour la zone Nord-Ouest, les valeurs ne sont pas représentatives pour cette pierre.

Pour la suite des simulations, l'orientation au Sud sera conservée, bien que la différence soit faible pour la température de surface intérieure, il sera assumé qu'elle est suffisamment représentative.

	Surface Ext. Sud		Surface Ext. Ouest		Surface Ext. Nord		Surface Ext. Est		Sud		Ouest		Nord		Est	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-0,78	17,59	-1,30	17,51	-1,48	24,74	-1,28	18,85	17,63	41,96	17,10	41,96	16,98	41,96	17,19	41,96
Maximale	39,39	99,20	39,91	100,00	33,83	100,00	40,70	100,00	24,14	62,35	24,11	62,38	23,79	63,00	24,36	61,84

Figure 120 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes orientations de la paroi analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

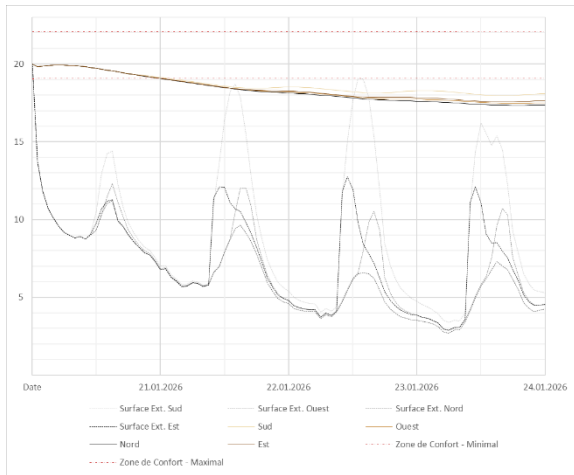


Figure 123 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

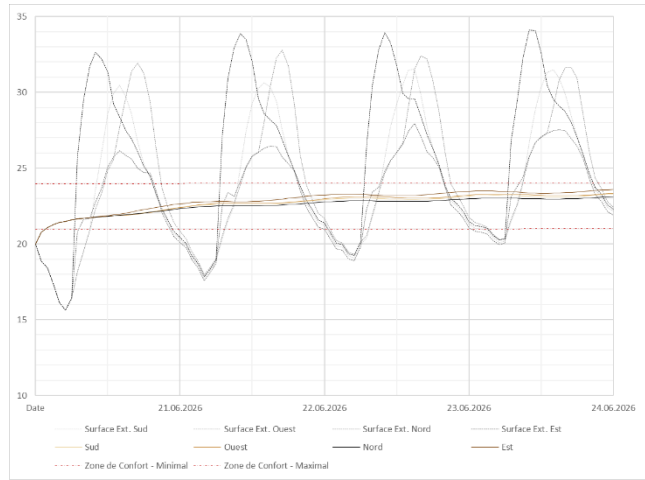


Figure 124 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Figure 122 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

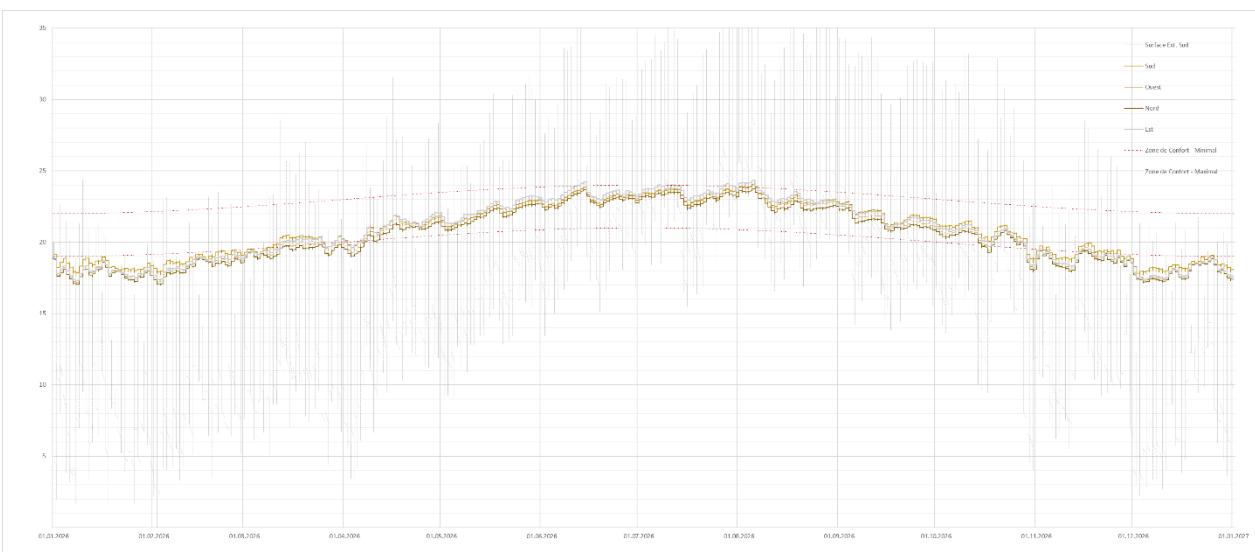


Figure 121 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

5.1.4_ Comparaison entre différents fruits de la paroi

Cette simulation a pour but de comprendre l'impact de l'inclinaison de la paroi. WUFI prenant en compte l'inclinaison de la paroi, l'épaisseur reste alors constante (ici 50cm). Cette expérience traduit l'utilisation du fruit, dans la construction d'un mur en pierre. Le fruit peut être utilisé afin de dimensionner l'épaisseur de la pierre en fonction de sa hauteur et donc des charges en compression qu'elle reprend. Le mur sera alors plus épais à sa base qu'à son sommet. Le but est donc de comprendre si un changement d'inclinaison de la surface extérieure permet de capter plus de rayonnement solaire et donc d'avoir une température de surface extérieure plus importante, traduisant une hausse de la température de surface intérieure.

Les inclinaisons testées sont les suivantes :

- 90° (vertical)
- 85°
- 80°
- 75°

5.1.4.1_ Zone Nord-Ouest

Les simulations sont donc réalisées aux trois échelles de temps dans la zone Nord-Ouest pour les quatre inclinaisons.

La Figure 127 et la Figure 130 montrent que la température de la surface intérieure entre un angle à 75° et 90° ne change pas, la différence est infime. La Figure 126 le démontre, la différence entre les températures maximales et minimales est de l'ordre du centième de degrés Celsius. Il en est de même pour la température de la surface extérieure selon les différentes inclinaisons.

Lors de cette simulation, au niveau du calcul de déperdition thermique de la paroi, rien ne change mise à part l'angle d'impact du rayonnement solaire sur la paroi. Comme le démontre, les résultats, ce paramètre n'est d'aucune importance dans l'évolution de la température de la surface intérieure.

Lorsque l'on observe attentivement la Figure 130 ou l'Annexe 28, la température de la surface intérieure de la paroi inclinée à 75° est légèrement supérieure. Au même titre que pour l'orientation de

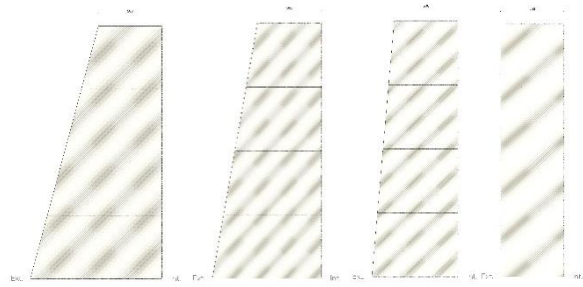


Figure 125 : Différents fruits de la paroi analysés

la paroi, la différence peut se faire après une succession de jours d'ensoleillement. Mais cette augmentation est trop faible pour être considérée comme impactante.

La différence élevée de température de surface extérieure étudiée précédemment avec les orientations induisait une différence de température de surface intérieure de l'ordre d'un demi degré en hiver et de quelques dixièmes de degrés en été.

Ici, la différence de température de surface extérieure est bien présente, avec 36,54°C pour un angle de 90° et de 38°C pour un angle de 75°. Cette différence est bien trop faible. Précédemment, une différence de 6°C à l'extérieur induisait une différence de 0,2°C à l'intérieur en été. Une différence de seulement 1,5°C pour la surface extérieure ne permet pas un gain significatif. En revanche, l'angle d'inclinaison a bien un impact sur l'échauffement de la surface extérieure d'un mur en pierre.

En effet, la Figure 126 montre que la différence de température de surface intérieure minimale est de 0,04°C entre les quatre inclinaisons et de 0,16°C pour la température de surface intérieure. L'impact est donc bien présent, mais il n'est pas suffisamment significatif.

Cette simulation permet alors de démontrer que l'angle d'inclinaison n'a pas d'impact sur la température de la surface intérieure. En revanche, la simulation sur les différentes épaisseurs permettra de comprendre si cette dernière a un impact. Dans ce cas, la notion de fruit (et non d'inclinaison) prenant en compte aussi le changement d'épaisseur sur la partie basse, si cette dernière est donc très importante, peut avoir un impact. Le changement de l'angle d'impact du rayonnement sur la surface extérieure d'un mur en pierre n'a elle aucun impact sur la température de surface intérieure.

	Surface Ext. 90°		Surface Ext. 85°		Surface Ext. 80°		Surface Ext. 75°		90°		85°		80°		75°	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-0,72	19,92	-0,86	19,24	-1,00	18,68	-1,15	18,25	16,19	50,40	16,18	50,40	16,16	50,41	16,15	50,41
Maximale	36,54	100,00	37,11	100,00	37,60	100,00	38,01	100,00	22,43	76,73	22,49	76,71	22,54	76,69	22,59	76,68

Figure 126 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différents fruits de la paroi analysés à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

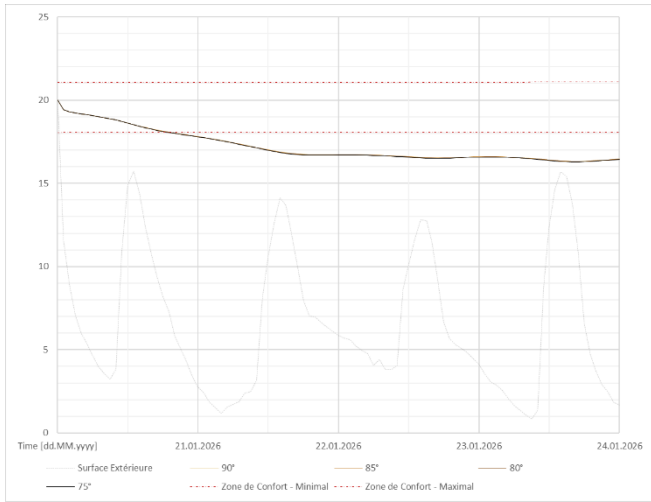


Figure 127 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

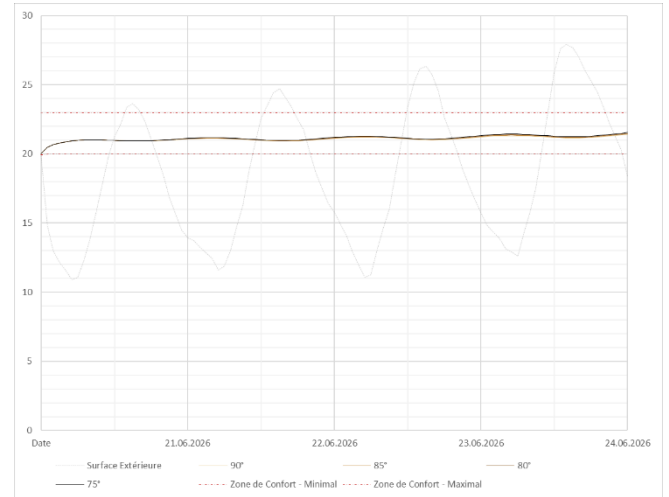


Figure 130 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Figure 128 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

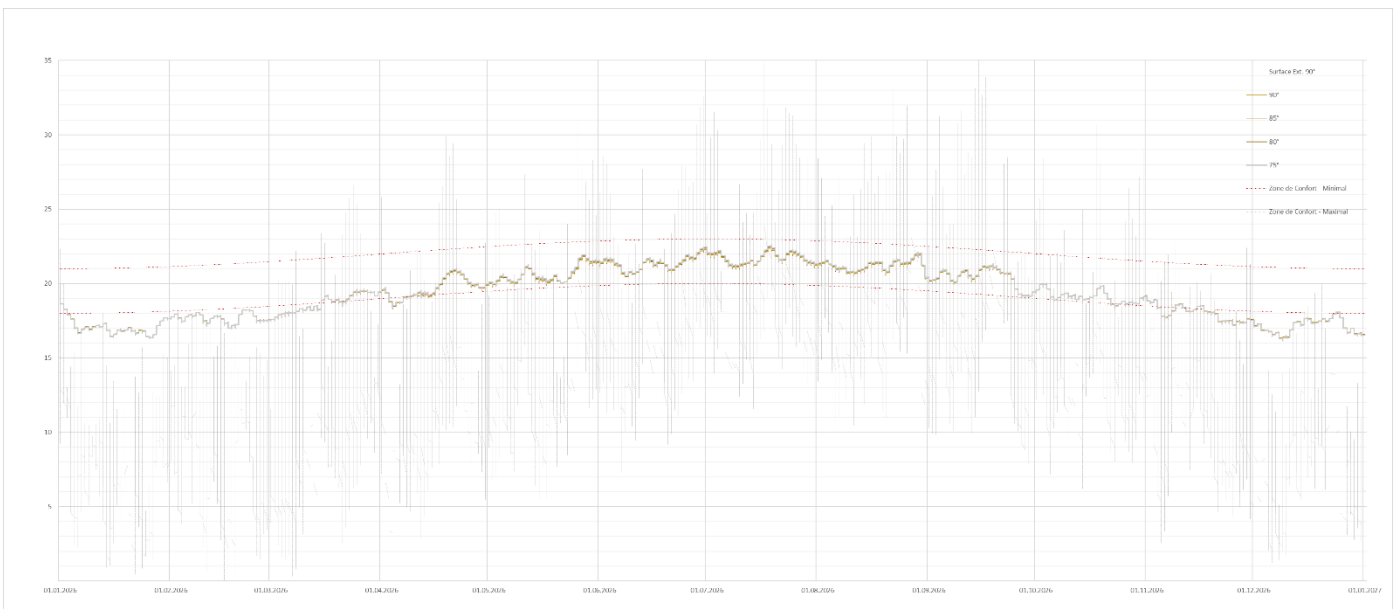


Figure 129 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

5.1.4.2_ Zone Sud-Est

Les simulations sont réalisées de manière identique pour la zone Sud-Est.

L'ensoleillement étant plus important dans cette partie de la France, il est justifiable de se demander si la différence entre les températures de surface extérieures et celles de surface intérieure peut être significative selon l'inclinaison du mur.

La Figure 134 montre que comme précédemment, l'ensemble des températures de surface son presque entièrement dans la zone de confort définie dans cette zone. Mais que l'on ne peut distinguer de réelle différence entre les températures des différentes inclinaisons de parois simulées. La Figure 132 démontre une légère différence durant l'été avec une température de surface intérieure plus élevée pour la paroi inclinée à 75°.

Par ailleurs, la Figure 135 et la Figure 133 montrent une différence imperceptible, donc non significative entre les différentes inclinaisons. Bien que les graphiques présentés de l'Annexe 31 à l'Annexe 32 offrent un zoom sur les valeurs. Nous n'observons qu'une infime différence. Une différence finalement plus fine que dans la zone Nord-Ouest.

Nous pouvons observer que durant la période estivale, la température surface intérieure de la paroi à 75° est légèrement plus élevée et que durant la période hivernale elle est légèrement inférieure, face aux autres inclinaisons. Il en résulte même une efficacité inférieure de la paroi inclinée à 75°.

La Figure 131 montre que la différence entre les températures minimales est de 0,05°C avec une température de 17,63°C pour la paroi à 90°. Une différence donc trop faible pour assumer quelconque intérêt. Pour la température maximale sur l'année, la différence entre les valeurs est de 0,14°C avec la température la plus faible pour la paroi à 90° avec 24,14°C.

Contrairement aux attentes, et surtout dans cette zone, l'inclinaison de la surface extérieure de la paroi ne permet aucun avantage quant aux transferts de chaleur dans la paroi. Ici, la paroi inclinée à 75° donne même une paroi plus froide en hiver et plus chaude en été à l'intérieur, même si les différences de températures sont très faibles.

Le fruit d'un mur en pierre n'a alors aucun avantage gagné d'un point de vue de l'angle d'inclinaison de la surface extérieure. En revanche, bien que non simulé ici, un fruit permet d'avoir une épaisseur plus importante à la base du mur. La simulation 5.1.1.6, présentée par la suite, permettra de visualiser l'impact de l'épaisseur d'une paroi en pierre sur les transferts de chaleur et d'humidité en son sein.

	Surface Extérieure		90°		85°		80°		75°	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-0,78	17,59	17,63	41,96	17,62	41,96	17,60	41,96	17,58	41,96
Maximale	39,39	99,20	24,14	62,35	24,19	62,29	24,24	62,24	24,28	62,19

Figure 131 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différents fruits de la paroi analysés à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

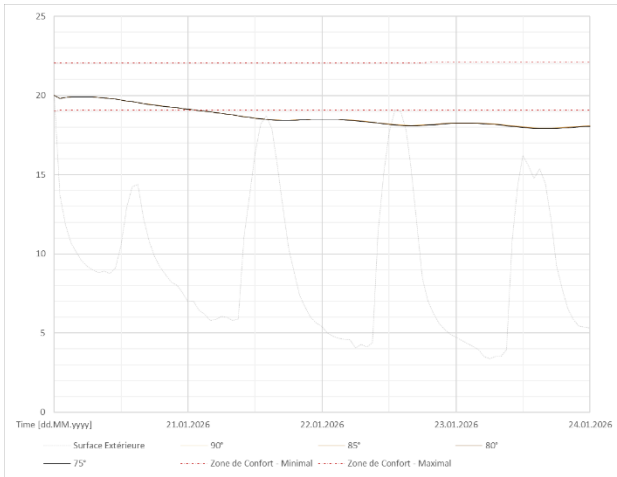


Figure 133 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

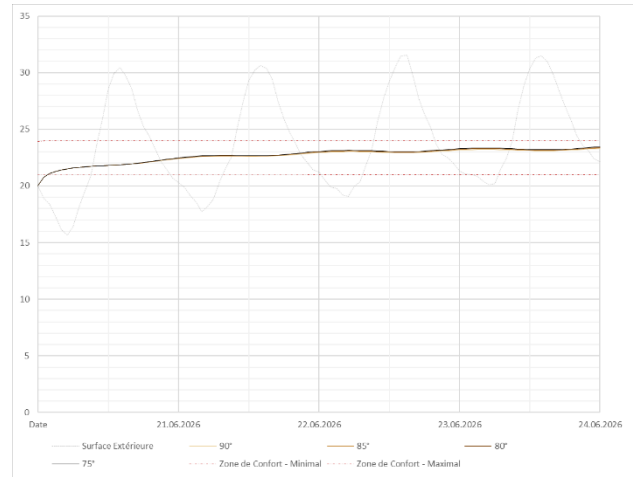


Figure 135 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Figure 132 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

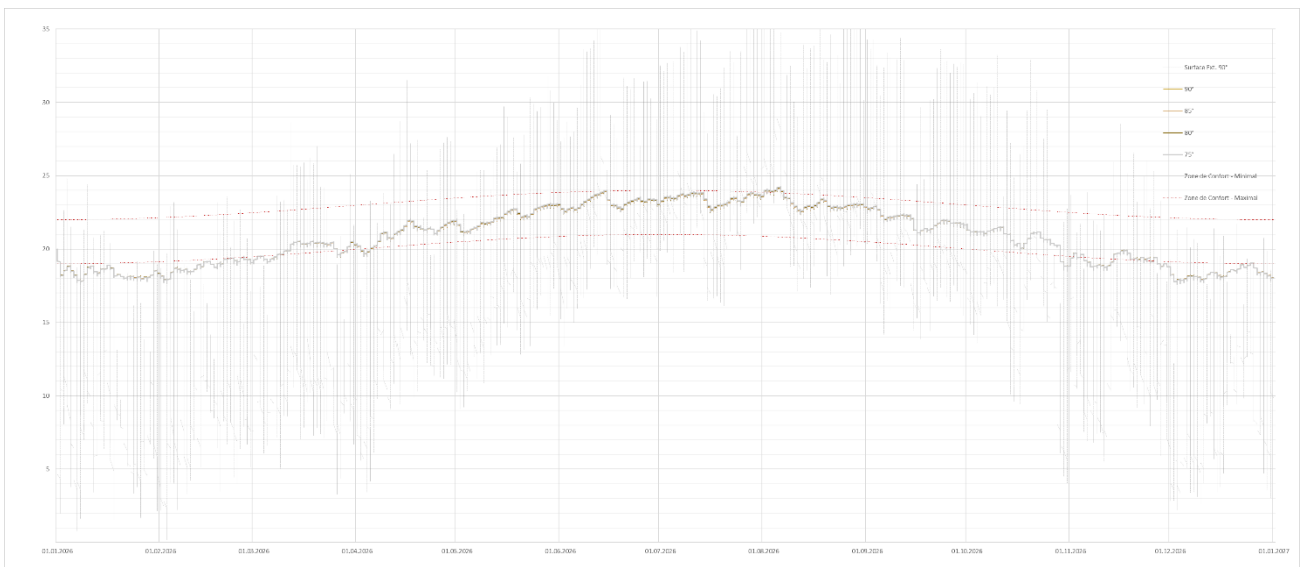


Figure 134 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

5.1.5_ Comparaison entre différentes pierres calcaires disponibles

Le but de cette analyse est d'approfondir les recherches sur les transferts de chaleur dans les parois en pierres calcaires. Selon la simulation réalisée dans la partie 5.1.1.2, la pierre calcaire présentait des résultats plus intéressants et plus à même d'apporter un confort hygrothermique à l'intérieur.

Il conviendra donc d'analyser différentes pierres calcaires présentes dans chaque zone avec des données très précises, trouvées dans la littérature existante, afin de se rapprocher de la réalité. L'objectif est alors de comparer les différentes pierres calcaires.

Renvoyer vers le tableau descriptif, simulations avec une épaisseur de paroi de 50cm pour les simulations comparatives entre les différentes pierres calcaire.

Ici, on intègre l'entièreté des données précisées dans la partie 4.2.2 de chaque pierre et même la conductivité thermique pour une pierre saturée en eau. Ainsi, avec la fluctuation d'humidité et donc de teneur en eau de la paroi, la simulation prend en compte la variation de la conductivité thermique tout au long des simulation.

Avant d'analyser les résultats des simulations, il est important de regarder les données des différentes pierres afin de les comparer.

La Figure 140 présentes les données principales utilisées pour les simulations. Les pierres sont classées selon les deux zones d'études représentées par les villes de Rennes et Marseille.

Dans l'ensemble, les données sont assez proches. La densité moyenne est de 1669 kg/m³, correspondant à la valeur utilisée pour les calcaires tendres simulés plus tôt. Néanmoins, les densités varient selon les différentes roches calcaires montrant bien qu'au sein d'un même type de pierre, les propriétés physiques peuvent varier.

La porosité moyenne est de 27%, correspondant aussi à la valeur utilisée plus tôt. Les valeurs sont dans l'ensemble assez proches. De plus, les pierres les plus légères, possèdent une porosité plus importante et inversement. La densité de la roche indique par ratio sa variation de porosité.

Cependant, la capacité thermique massique est similaire pour l'ensemble des roches étudiées, et la moyenne est de 737 J/kgK. Cette valeur est sensiblement inférieure à la capacité thermique utilisée pour le calcaire tendre précédemment.

En revanche, la conductivité thermique des pierres étudiées est bien plus faible avec une moyenne de 0,71 W/mK que la pierre calcaire tendre. C'est le paramètre qui varie le plus, la pierre avec la plus faible conductivité thermique est la pierre de Tuffeau avec 0,56 W/mK et avec la plus élevée est la pierre de Beaulieu avec 0,86 W/mK.

La conductivité thermique semble liée à la porosité de la pierre. La pierre de Tuffeau possède la porosité la plus élevée et la conductivité thermique la plus faible. Néanmoins, la pierre de Beaulieu ayant la conductivité thermique la plus élevée n'a pas la porosité la plus faible. Cependant, la conductivité thermique varie fortement selon les types de pierres calcaires.

Un paramètre important dans les simulations hygrothermiques apparaît avec les données plus précises sur ces pierres : la conductivité thermique d'une pierre saturée en eau (environ 80% d'humidité). En effet, la pierre permet une régulation de l'humidité intérieure et extérieure, en surface notamment, et son taux d'humidité impact sa conductivité thermique car les pores d'air remplis d'eau conduisent plus rapidement la chaleur. Ici, la conductivité thermique saturée en eau est en moyenne de 1,16 W/mK. Elle diffère moins selon les pierres.

La différence entre la conductivité thermique d'une pierre sèche et saturée en eau peut varier fortement comme pour la pierre de Tuffeau avec une valeur deux fois supérieure pour une pierre saturée en eau.

Le choix entre les différentes pierres calcaire semble alors être important au même titre que le choix du type de pierre.

Les simulations suivantes auront donc pour but de comparer les différences et de mesurer les efficacités des différentes pierres pour une paroi non isolée.

	Densité ou masse volumique	Porosité	Capacité thermique massique	Conductivité thermique (sec)	Facteur de résistance à diffusion de l'eau
	kg/m ³				
Granite	2600	1	1560	2,4	10 000
Grès	2600	15	1560	1,6	30
Schiste	2400	4	1440	1,9	900
Calcaire tendre	1600	25	960	0,92	30

Figure 138 : Tableau des propriétés physiques et thermiques de différentes pierres (Source : Données de RBN, 2013)

			Densité ou masse volumique	Porosité	Capacité thermique massique	Conductivité thermique (sec)	Conductivité thermique (saturé en eau)	Facteur de résistance à diffusion de l'eau (sec, 0-50)
			kg/m ³					
Pierre	Rennes	Pierre de Noyant	1761	0,25	718	0,76	1,15	15
		Pierre de Saint Vaast Fine	1520	0,31	739	0,58	1,07	9
		Pierre de Tuffeau	1390	0,33	729	0,56	1,11	9
	Marseille	Pierre de VPDG	1833	0,20	763	0,77	1,17	32
		Pierre de Beaulieu	1842	0,25	737	0,86	1,31	18

Figure 137 : Tableau des valeurs utilisées pour les simulations dans WUFI (Source : Auteur, données de PESTRE, 2021)

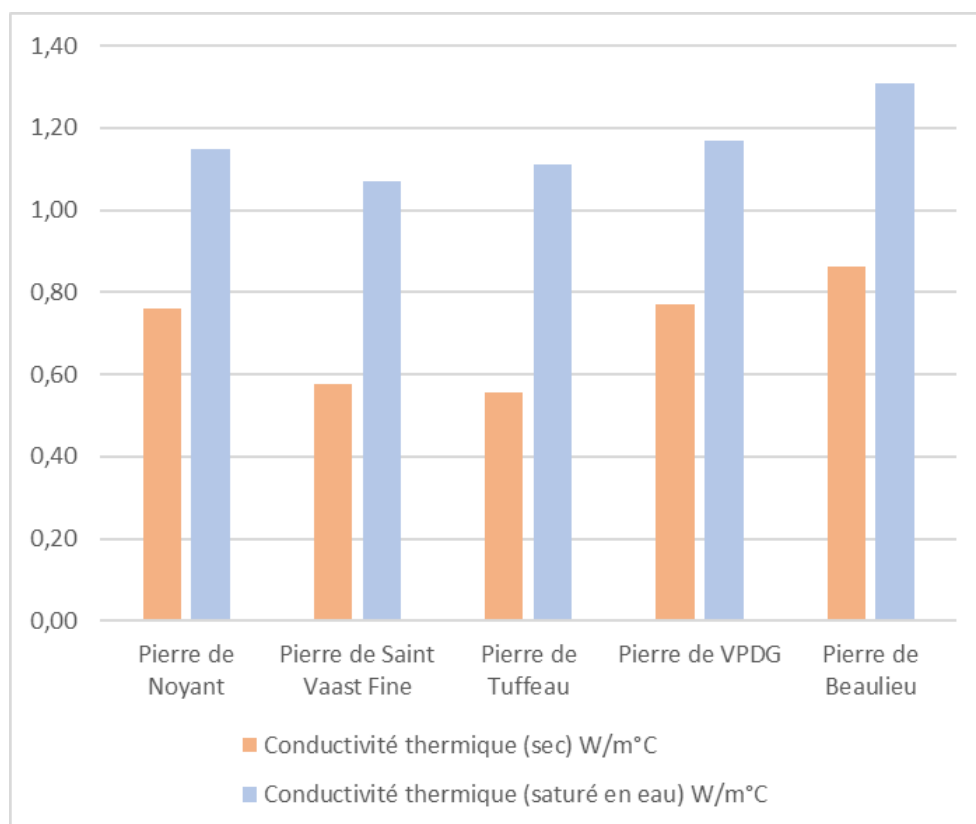


Figure 136 : Comparaison entre les conductivités thermiques (pierres sèches et saturées en eau) des différentes pierres calcaires analysées (Source : Auteur)

5.1.5.1_ Zone Nord-Ouest

Cette simulation présente les résultats de la comparaison entre différentes pierres calcaires pouvant être utilisées pour la construction d'une maison dans la zone Nord-Ouest. Les pierres comparées ici sont les suivantes :

- Pierre de Noyant
- Pierre de Saint-Vaast-Fine
- Pierre de Tuffeau

A première vue, lorsque l'on observe la Figure 142, il n'existe aucune différence significative entre les différentes pierres pour la température de surface intérieure. En revanche, un léger zoom, comme présenté par la Figure 141 permet de relever quelques différences. La température de la surface intérieure est plus importante en hiver pour la pierre de Saint-Vaast-Fine. La pierre de Tuffeau est juste en dessous et la température la plus faible est atteinte par la pierre de Noyant. Cette observation traduit bien les différences entre les conductivités thermiques des pierres. La pierre de Noyant ayant la conductivité thermique la plus élevée (0,76 W/mK). En revanche, la conductivité thermique de la pierre de Saint-Vaast-Fine et de la pierre de Tuffeau est sensiblement identique (0,58 et 0,56 W/mK). Quelles sont les raisons de cette différence entre les résultats ?

La différence se fait dans un premier temps par une différence entre les capacités thermiques, plus importante pour la pierre de Saint-Vaast-Fine et une conductivité thermique légèrement plus faible pour cette dernière aussi. De plus, les valeurs présentées par la Figure 139 montrent que la pierre de Saint-Vaast-Fine est bien plus résistante à l'eau et à la vapeur d'eau. Cette dernière a dans un premier temps une conductivité thermique plus faible lorsque la pierre est humide et en plus, elle n'est que très difficilement humide. Cette résistance à l'eau et à la vapeur d'eau lui permet de palier à l'augmentation de l'humidité relative de l'air et de la pluie en hiver (Annexe 38 et Annexe 40).

Ses propriétés thermiques étant alors moins impactées, elle est donc plus efficace en hiver (Figure 144) et permet d'atteindre une température de surface intérieure en hiver plus importante. Et ce surtout lorsque le soleil d'hiver permet de sécher la pierre. En revanche, lorsque les pierres de Saint-Vaast-Fine et de Tuffeau sont sèches, elles ont les mêmes propriétés thermiques. Le zoom (cf. annexe) sur la température intérieure

	Surface Extérieure		Noyant		Saint Vaast Fine		Tuffeau	
	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-1,26	19,16	16,53	51,42	17,05	50,80	16,95	52,50
Maximale	37,51	100,00	22,37	75,62	22,26	74,31	22,22	74,22

Figure 140 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes pierres calcaires analysés à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

	Conductivité thermique (sec)	Coefficient de conductivité thermique (sec)		Résistance à la conduction (sec)		Conductivité thermique (saturé en eau)	Coefficient de conductivité thermique (sec)		Résistance à la conduction (sec)	
	W/m°C	W/m²°C	m²K/C	m²K/C	W/m°C	W/m°C	W/m²°C	m²K/C	m²K/C	m²K/C
Pierre de Noyant	0,76	0,31	0,5	0,31	0,5	1,15	0,31	0,5	0,31	0,5
Pierre de Saint Vaast Fine	0,58	1,78	1,21	0,56	0,82	1,15	2,35	1,67	0,43	0,60
Pierre de Tuffeau	0,56	1,46	0,97	0,68	1,03	1,07	2,25	1,58	0,45	0,63

Figure 139 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

en été montre tout de même une température légèrement plus importante. Cette observation est intéressante, même la pierre ayant la capacité thermique la plus importante et la conductivité thermique la plus faible a une température de surface intérieure plus élevée, alors qu'elle présente un meilleur pouvoir isolant que les autres, et ce, pour une épaisseur identique.

Ces résultats permettent alors de mettre en avant l'importance des propriétés hygroscopiques d'une pierres. Ces dernières impactent alors sa teneur en eau et donc sa conductivité thermique. Des pierres ayant la même conductivité semblent identique et pourtant une différence est observable dans les résultats. Néanmoins, la différence reste minime.

Les températures minimales, aux conditions les plus défavorables sont sensiblement les mêmes et sont d'environ 17°C. Néanmoins, cela démontre qu'il est aussi important d'avoir les données précises pour le type de pierre plutôt que de prendre les données génériques d'une pierre calcaire tendre. Leur composition pouvant énormément varier, on remarque ici qu'une pierre avec de bonnes propriétés permet d'atteindre une température qui se rapproche de la valeur minimale attendue de 18°C pour 50cm d'épaisseur et ce sans isolation.

Pour la gestion de l'humidité, les données plus précises permettent une proximité à la réalité plus importante pour ces pierres. Pour une paroi de 50cm non isolée, et ce peu importe le type de pierre employé, la paroi permet de réguler l'humidité et d'être entièrement dans la zone de confort définie à l'intérieur (Annexe 38).

En comparaison aux autres simulations, les différents types de pierres influencent la température de surface intérieure. Elle diffère ici de 0,5°C. Pour la pierre de Saint-Vaast-Fine avec une valeur minimale aux conditions les plus défavorables de 17,05°C contre 16,2°C (Figure 115) pour la pierre de calcaire tendre générique à épaisseur égale au sud.

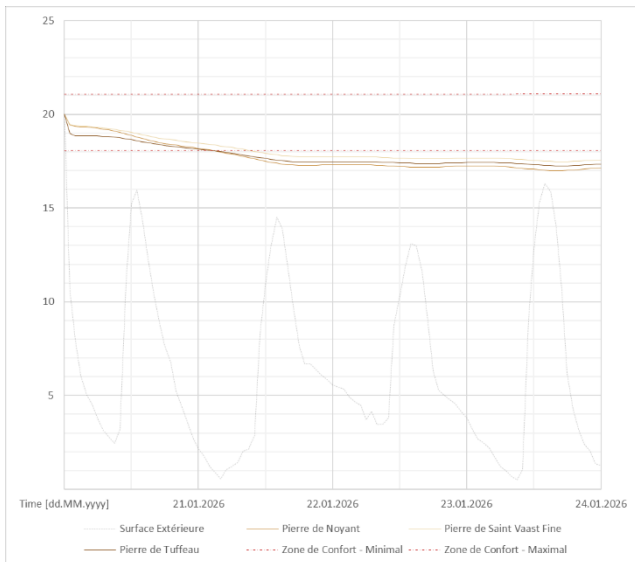


Figure 144 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

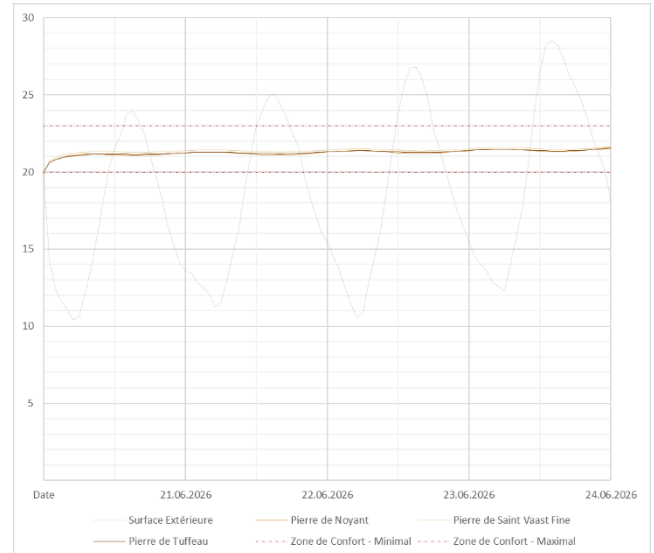


Figure 143 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Figure 141 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

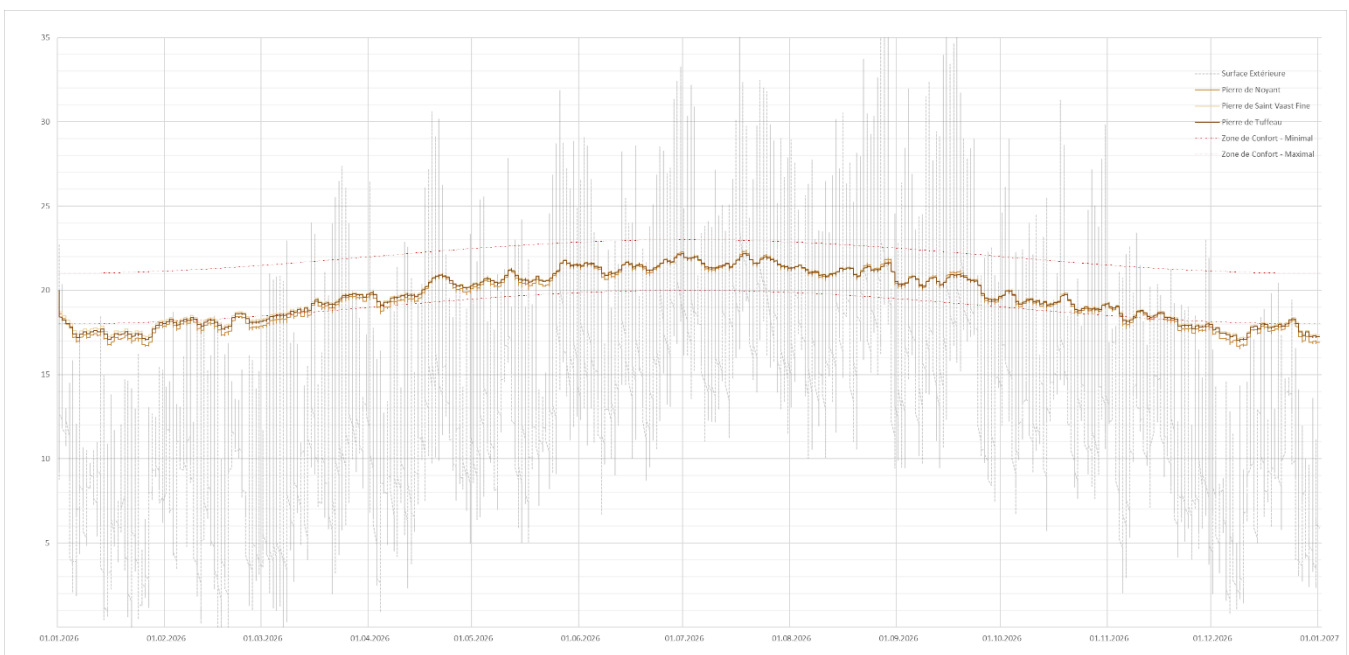


Figure 142 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

5.1.5.2_ Zone Sud-Est

Cette simulation présente les résultats de la comparaison entre différentes pierres calcaires pouvant être utilisées pour la construction d'une maison dans la zone Sud-Est. Les pierres comparées ici sont les suivantes :

- Pierre de Vers-Pont-du-Gard (VPDG)
- Pierre de Beaulieu

A première vue, lorsque l'on observe la Figure 147, il n'existe aucune différence significative entre les différentes pierres pour la température de surface intérieure. Même avec un léger zoom, comme présenté par la Figure 150 la température de la surface intérieure est presque identique. Une petite différence apparaît en hiver avec une pierre de Vers-Pont-du-Gard légèrement plus isolante. La pierre de Tufeu est juste en dessous et la température la plus faible est atteinte par la pierre de Noyant.

Cette observation traduit bien les différences entre les conductivités thermiques des pierres. La pierre de Beaulieu ayant la conductivité thermique la plus élevée (0,86 W/mK). En revanche, la conductivité thermique de la pierre de Vers-Pont-du-Gard est tout de même élevée (0,77 W/mK) en comparaison aux pierres de la zone Nord-Ouest.

Malgré une différence de 0,1 W/mK entre les conductivités thermiques, le coefficient de conductivité thermique reste très proche et très élevé pour les deux pierres. Et cela se traduit dans les résultats, les différences de températures de surfaces intérieures sont très minimes. On le voit avec les températures minimales (Figure 146) qui sont écartées de 0,2°C seulement. Il en est de même pour les températures maximales observées.

En hiver, à l'échelle de quelques jours, malgré un ensoleillement important, la différence est très faible entre les deux pierres. Pourtant, la pierre de VPDG présente une bien plus forte résistance à la vapeur d'eau. De plus, la pierre de VPDG présente une plus faible conductivité thermique lorsqu'elle est saturée en eau (1,17 W/mK) que la pierre de Beaulieu (1,31 W/mK). La Figure 149 montre une très faible variation de température et le zoom sur les valeurs (cf. annexe) permet de voir que la pierre de VPDG présente une température de surface intérieure légèrement supérieure à la pierre de Beaulieu.

	Conductivité thermique (sec)	Coefficient de conductivité thermique (sec)		Résistance à la conduction (sec)		Conductivité thermique (saturé en eau)	Coefficient de conductivité thermique (sec)		Résistance à la conduction (sec)	
		W/m ² C	m ² K/C	W/m ² C	m ² K/C		W/m ² C	m ² K/C		
Pierre de VPDG	0,77	1,80	1,23	0,55	0,81	1,17	2,37	1,69	0,42	0,59
Pierre de Beaulieu	0,86	1,95	1,34	0,51	0,75	1,31	2,54	1,83	0,39	0,55

Figure 145 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

En été, la différence est aussi très faible (Figure 148), bien que le zoom (Annexe 41) permette de voir plus précisément la différence, elle reste faible. La pierre de VPDG présente ici une température en été légèrement inférieure à la pierre de Beaulieu à l'intérieur. Ceci peut s'expliquer dû à une conductivité thermique plus faible mais aussi dû à sa capacité thermique plus élevée permettant de stocker la chaleur. Elle lui permet d'ailleurs d'avoir des fluctuations plus réduites et une température plus lisse à l'échelle de la journée.

A l'année, les températures de surfaces intérieures sont intéressantes et se rapprochent fortement des valeurs définies pour la zone de confort. Elles sont désormais comprises dedans en été et légèrement en dessous en hiver. Bien que, pour les deux pierres, la température minimale soit très proche des 18°C.

De plus, les documents présentés de l'Annexe 41 à l'Annexe 45 montrent une humidité de surface intérieure comprise entièrement dans la zone de confort définie. Les valeurs sont maintenant représentatives de la réalité dû à la quantité de données utilisées pour les simulations. Une paroi en pierre de 50cm permet de parfaitement réguler l'humidité entre intérieur et extérieur. La paroi lisse les variations extérieures à l'année et à l'échelle de plusieurs jours.

Pour la suite des simulations, la pierre de Saint-Vaast-Fine sera conservée pour les simulations dans la zone Nord-Ouest et la pierre de Vers-Pont-du-Gard pour les simulations dans la zone Sud-Est.

	Surface Extérieure		VPDG		Beaulieu	
	T	H	T	H	T	H
Minimale	-1,21	17,12	17,90	42,07	17,70	41,43
Maximale	39,97	99,48	23,95	61,72	24,11	62,22

Figure 146 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes pierres calcaires analysés à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

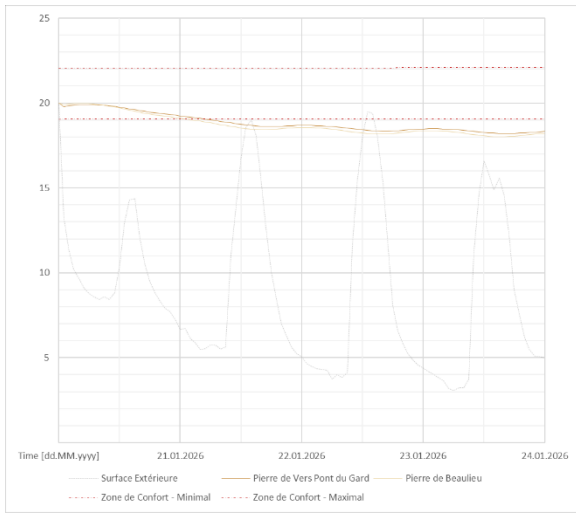


Figure 149 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

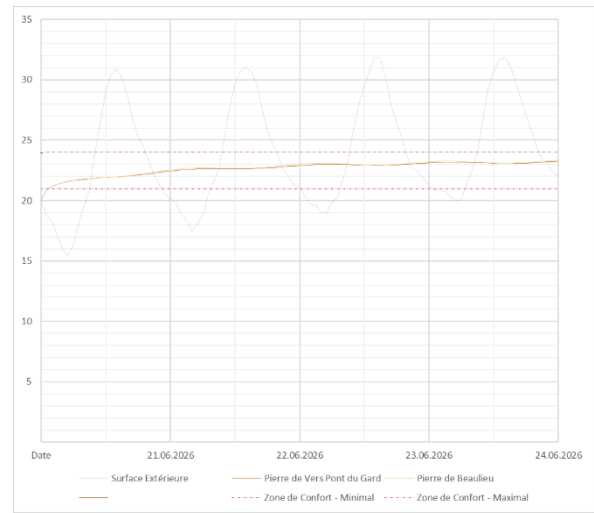


Figure 148 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Figure 150 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

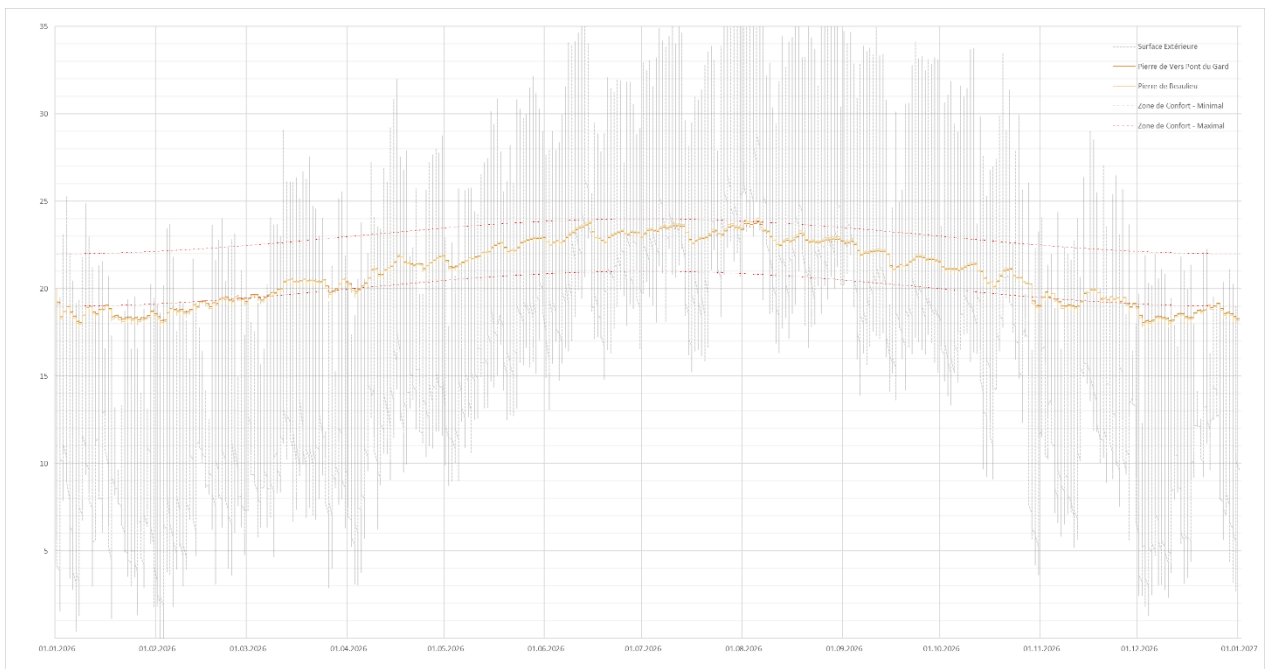


Figure 147 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

5.1.6_ Comparaison entre différentes épaisseurs pour une paroi en pierre calcaire

Cette simulation a pour but de comprendre l'importance et l'impact du changement de l'épaisseur d'un mur de pierre. Les épaisseurs testées sont les suivantes :

- 20cm
- 30cm
- 40cm
- 50cm
- 60cm
- 80cm

Un mur de 20cm semble peu réaliste et sera très rarement employé, mais cela permet de mieux comprendre le comportement hygrothermique d'un mur en pierre avec deux extrêmes (20 et 80cm). Il est notamment intéressant de comprendre la relation entre l'épaisseur du mur et l'impact sur le coefficient de conductivité de la paroi.

5.1.6.1_ Zone Nord-Ouest

Les simulations sont donc réalisées aux trois échelles de temps dans la zone Nord-Ouest pour les six épaisseurs de paroi.

L'épaisseur impact énormément le calcul de U et de R pour une paroi, la Figure 151 le démontre. Pour la pierre de Saint-Vaast-Fine, que nous avons gardé pour la suite des simulations de la zone Nord-Ouest, permet d'atteindre une valeur de U inférieure à 1 W/m²K. Ces valeurs restent très élevées. Cependant, la différence entre l'évolution du coefficient de conductivité n'est pas linéaire et les variations sont de plus en plus faibles avec l'épaississement de la paroi. De plus, les valeurs pour une pierre saturées sont très élevées et ne descendent pas en dessous de 1 W/m²K et ce même pour 80cm de pierre. Il semble que 40cm de pierre sèche équivaut ici à 80cm de pierre humide. La différence est très importante.

Dans un premier temps, observons l'évolution de la température de la surface intérieure en été (Figure 154). Ici on comprend bien l'effet d'inertie thermique. Une pierre avec 20cm d'épaisseur offre une inertie avec un temps de réponse plutôt faible. Plus l'épaisseur augmente, plus le temps de réponse augmente en retour, une pierre de 50cm d'épaisseur semble avoir un temps de réponse de

Pierre de Saint Vaast Fine				
Combinaison	R (sec)	U (sec)	R (saturé)	U (saturé)
cm/cm	m ² K/°C	W/m ² °C	m ² K/°C	W/m ² °C
0,2	0,51	1,95	0,35	2,84
0,3	0,68	1,46	0,45	2,25
0,4	0,86	1,17	0,54	1,86
0,5	1,03	0,97	0,63	1,58
0,6	1,20	0,83	0,73	1,38
0,8	1,55	0,64	0,91	1,10

Figure 151 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

presque 24h, distribuant la chaleur de la journée pendant la nuit. Ceci est souvent recherché pour une notion de confort amenant une paroi « chaude » la nuit quand la température de l'air baisse et une paroi « froide » lorsque la température extérieure est élevée. Néanmoins, à cette épaisseur (50cm) et ce climat, la différence entre la nuit et la journée est très faible (1/4 de degré Celsius, Figure annexe).

De manière générale, plus l'épaisseur de la pierre est importante, plus de temps de réponse est long et plus la température de la surface intérieure tends à se lisser autour d'une température moyenne. Plus l'épaisseur augmente plus cette température moyenne augmente et ce, même en été.

La Figure 156 montre bien que la température de la surface intérieure pour une épaisseur de 80cm de pierre de Saint-Vaast-Fine, la température se lisse vers une moyenne saisonnière. Néanmoins, on observe tout de même des variations hebdomadaires. Durant l'hiver, l'épaisseur plus importante du mur en pierre permet une meilleure isolation et limite donc les déperditions, la température de la surface intérieure ne descend que très rarement sous les 18°C pour une température minimale à l'année (condition les plus défavorables, une nuit d'hiver) à 17,8°C. Tandis que pour la pierre de 20cm, le minimum est de 14,5°C. La Figure 153 le montre bien, plus le mur est épais, plus la température de la surface intérieure augmente. Elle augmente peu, et plus le mur s'épaissit, plus elle tend vers la température de la surface intérieure (ici 19°C en hiver).

La Figure 155 montre par ailleurs que l'on tend à se rapprocher de la zone de confort adaptative (en fonction de la période de l'année et du lieu, en pointillés rouges sur les graphiques). Certes, une température à 18°C reste faible, mais suffisante si elle n'arrive quelques fois et surtout pendant la nuit. De plus, ici est présenté la température de la surface intérieure de la paroi.

	Surface Extérieure		20cm		30cm		40cm		50cm		60cm		80cm	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-1,19	17,07	14,54	49,76	15,88	51,43	16,58	51,01	17,05	50,80	17,39	50,68	17,82	50,54
Maximale	38,70	100,00	24,25	85,05	23,07	78,93	22,52	75,70	22,26	74,31	22,14	73,48	22,03	72,46

Figure 152 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes épaisseurs de paroi analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

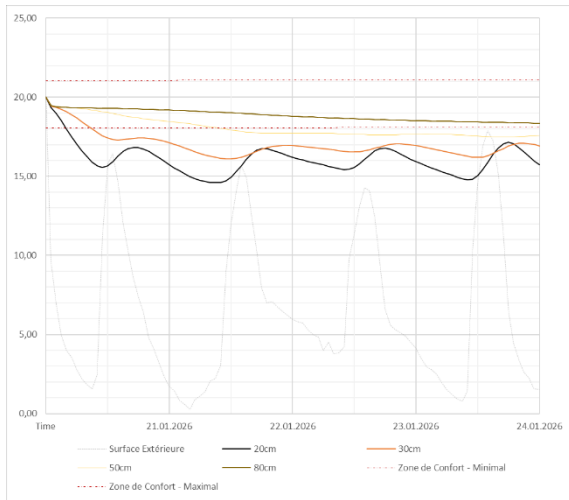


Figure 153 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

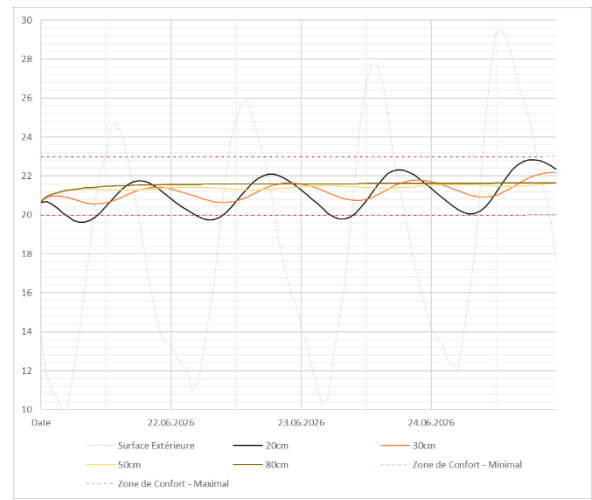


Figure 154 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

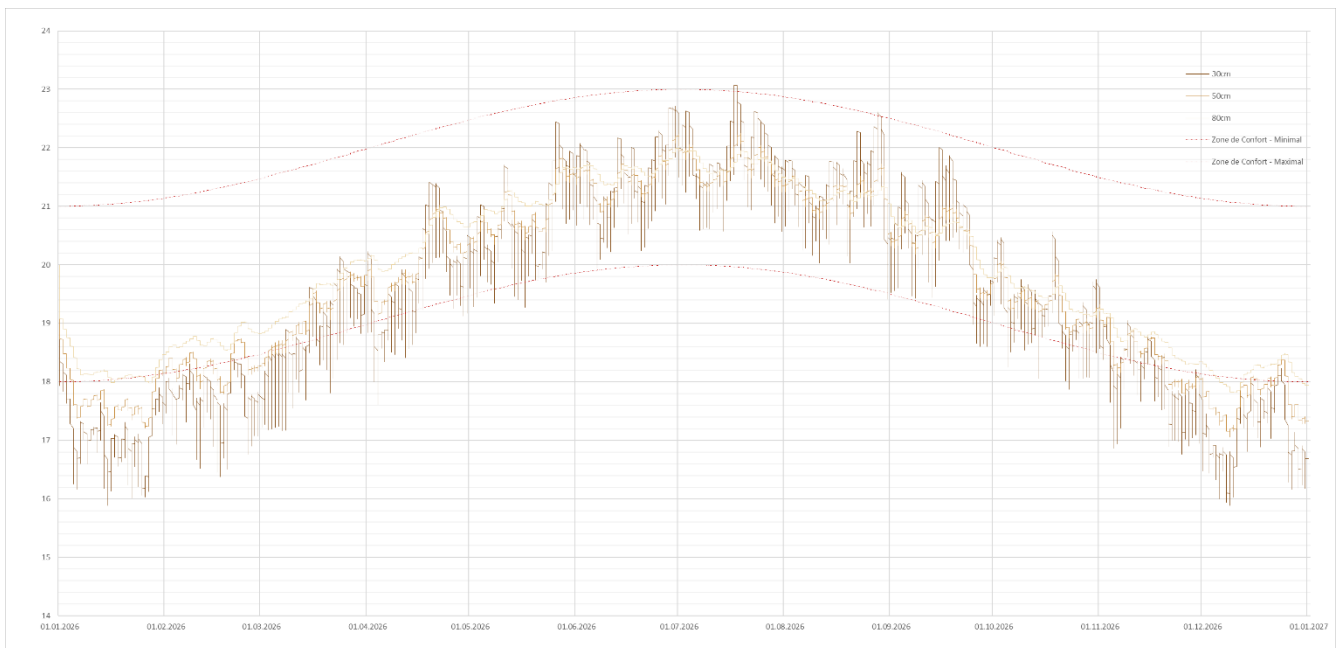


Figure 156 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

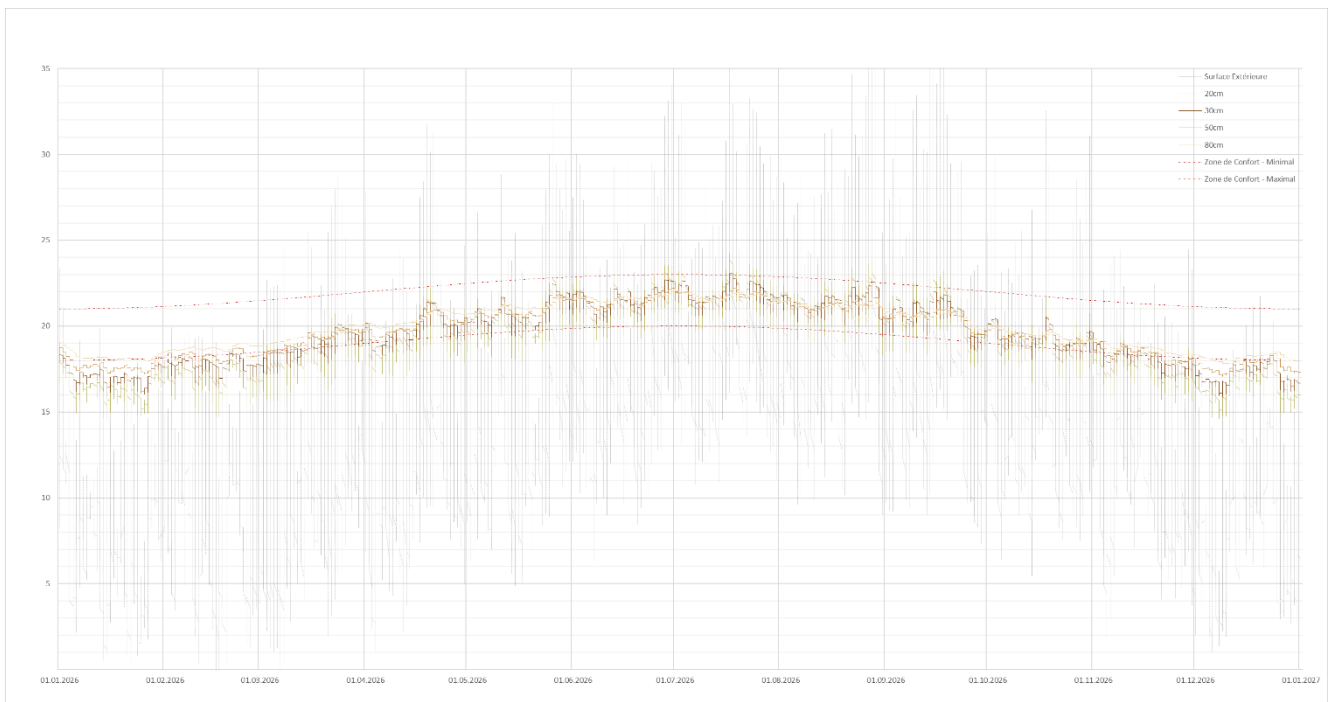


Figure 155 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

Un mur de 80cm de pierre de Saint-Vaast-Fine pourrait permettre un confort hygrothermique à l'intérieur d'une maison. Néanmoins, un mur de 80cm reste assez épais, le mur de 50cm ici est en dessous des attentes et reste insuffisant.

L'humidité est très bien gérée par la paroi et ce même pour une épaisseur de 30cm avec cette pierre, les valeurs sont dans la zone de confort (Annexe 48).

5.1.6.2_ Zone Sud-Est

Les simulations sont réalisées de manière identique pour la zone Sud-Est.

L'épaisseur de la paroi impact fortement les valeurs de U et de R pour cette pierre aussi. La Figure 157 montre en effet que pour la pierre de Vers-Pont-du-Gard, le coefficient de déperdition thermique est très élevé et ce même pour des épaisseurs importantes. Il faut dépasser les 60cm pour descendre en dessous de 1 W/m²K. Pour une pierre sèche, 60cm de pierre de Saint-Vaast-Fine présentée précédemment équivaut ici à 80cm de pierre de Vers-Pont-du-Gard avec une valeur de U de 0,83 W/m²K.

Pour la pierre de VPDG, la différence entre sa conductivité thermique à sec et lorsque saturée en eau est plus faible que pour la simulation précédente. Tout de même, l'écart est important, une épaisseur de 40cm de pierre sèche équivaut plus ou moins à 60cm de pierre humide.

La Figure 159 montre une importante différence de température entre les différentes pierres à l'année, observable plus précisément à l'aide de la Figure 160. Une paroi d'épaisseur de 30cm est très peu suffisante et présente des variations très importantes à l'échelle d'une semaine. Plus l'épaisseur augmente, plus la température de surface intérieure augmente en hiver et plus elle se stabilise en été (voir diminue). Pour une épaisseur de 30 et 50cm, les valeurs ne sont pas comprises dans la zone de confort définie en hiver bien qu'elles le soient majoritairement en inter saison et en hiver.

Pour une pierre de VPDG de 80cm, les températures de surfaces intérieures sont presque tout le temps comprises dans la zone de confort et supérieures à 19°C en hiver. Malgré un coefficient de déperdition thermique assez élevé (0,83 W/m²K), la

Pierre de VPDG				
Combinaison	R (sec)	U (sec)	R (saturé)	U (saturé)
cm/cm	m ² K/°C	W/m ² C	m ² K/°C	W/m ² C
0,2	0,42	2,35	0,34	2,98
0,3	0,55	1,80	0,42	2,37
0,4	0,68	1,46	0,51	1,97
0,5	0,81	1,23	0,59	1,69
0,6	0,94	1,06	0,68	1,48
0,8	1,20	0,83	0,85	1,18

Figure 157 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

température de surface intérieure est satisfaisante à l'année.

Lorsque l'on analyse l'évolution de la température de surface intérieure sur quelques jours en hiver (Figure 161), on comprend que plus la paroi est épaisse plus elle limite les déperditions mais aussi réduit la variation de température au cours de la journée. A partir de 50cm d'épaisseur, la température de surface intérieure d'une paroi en pierre dans cette zone climatique ne varie plus à l'échelle de la journée. Pour cette pierre, il faut une épaisseur supérieure à 80cm pour atteindre une température de surface supérieure à 19°C en hiver.

Une épaisseur importante permet d'atteindre une température minimale à l'année plus importante (18,75°C pour 80cm) et une température maximale plus faible (23,4°C pour 80cm), comme le montre la Figure 158.

En effet, en été (Figure 162), un épaississement de la paroi permet de lisser les variations de température et de tendre vers la température de l'air intérieur (ici 22°C). La température diminue et le temps de réponse devient tellement important qu'il annule toute variation sur une journée et la traduit à l'échelle de plusieurs jours, une semaine. Même une paroi de 50cm d'épaisseur dans cette zone présente une faible différence de température entre la nuit et la journée bien que le minimum soit en pleine journée et le maximum en pleine nuit.

De plus, la pierre de VPDG présente une bonne gestion de l'humidité à l'année et ce peu importe l'épaisseur à partir de 30cm de paroi (Annexe 54). Les valeurs peuvent être considérées réalistes au vu de la précision des données utilisées pour les simulations.

Cette pierre dans cette zone climatique nécessite tout de même une épaisseur importante afin de permettre une température de surface intérieure dans la zone de confort définie.

	Surface Extérieure		20cm		30cm		40cm		50cm		60cm		80cm	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-0,35	16,98	14,25	39,22	16,26	41,39	17,31	42,14	17,90	42,07	18,30	41,77	18,75	41,40
Maximale	39,56	99,98	26,50	71,80	25,04	65,70	24,35	63,20	23,95	61,72	23,69	61,17	23,41	60,56

Figure 158 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes épaisseurs de paroi analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

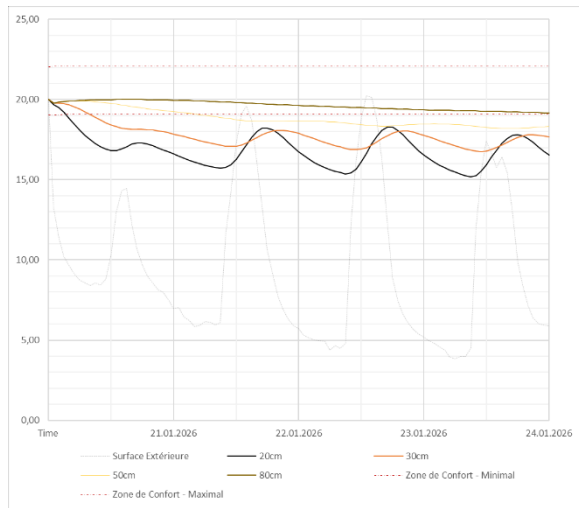


Figure 161 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

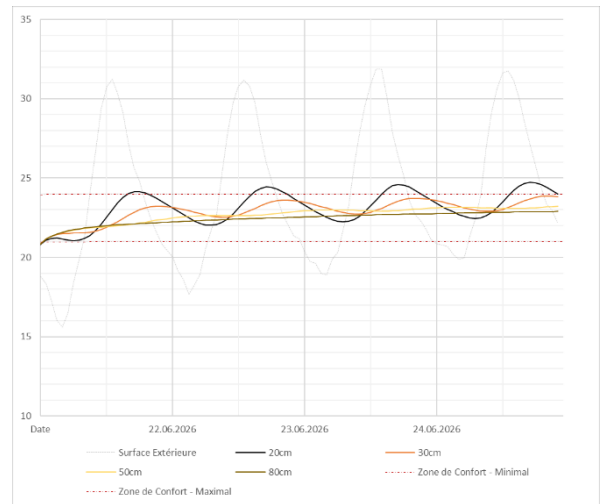


Figure 162 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

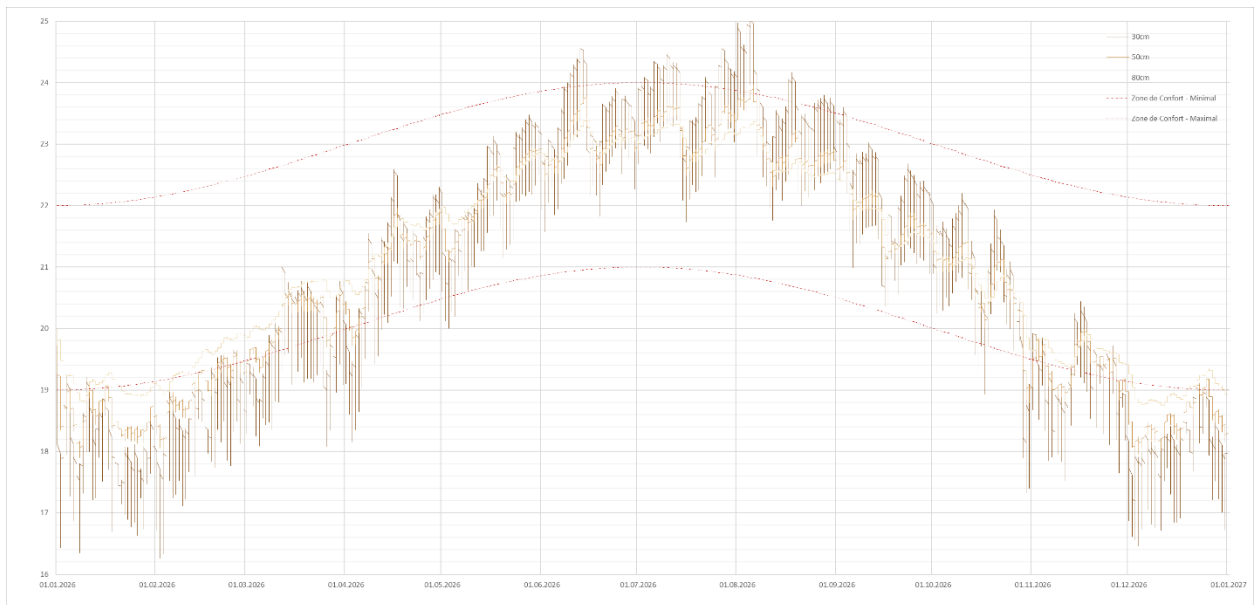


Figure 160 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

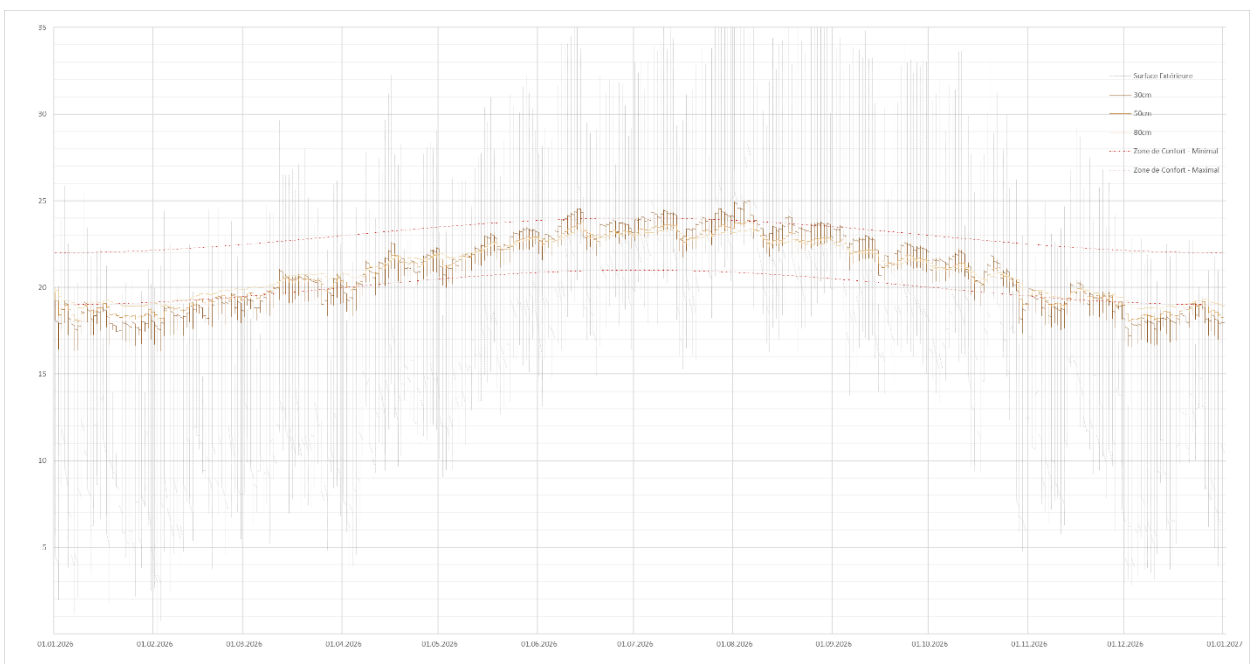


Figure 159 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

5.1.7_ Comparaison entre différentes combinaisons de paroi

L'analyse précédente a permis de démontrer que l'épaisseur de la paroi, joue le rôle le plus important dans l'efficacité thermique d'une cette dernière. En effet, la régulation hygrométrique ne semble pas être l'enjeu principal pour l'atteinte du confort intérieur, bien que son rôle impact l'efficacité thermique. L'épaisseur de la paroi est donc prédominant et une épaisseur importante est nécessaire pour assurer un certain confort (au minimum 60cm).

Il est donc question de compléter l'analyse avec l'ajout d'un isolant permettant de compléter la pierre et d'avoir une paroi plus efficace sans avoir recours à des épaisseurs trop importantes.

Pour la suite des analyses, la pierre sera complétée d'une épaisseur en béton de chanvre. Il conviendra donc d'analyser l'impact des épaisseurs de béton de chanvre et des différentes combinaisons possibles sur la température de surface intérieure et de l'évolution de la température et de l'humidité au sein de la paroi.

Présenté plus tôt, le béton de chanvre permet une meilleure isolation thermique ainsi qu'une bonne régulation hygrométrique en complément des propriétés de la pierre naturelle. En effet, comme le montre la Figure 163, Le béton de chanvre possède un coefficient de déperdition thermique bien inférieur aux pierres analysées les plus performantes thermiquement. Pour rappel, la conductivité thermique du béton de chanvre est de 0,1 W/mK, 5 à 8 fois inférieur que pour les pierres étudiées. Néanmoins, sa conductivité thermique ne le place pas comme un isolant, car ces derniers présentent généralement une conductivité thermique d'environ 0,04 W/mK. Le béton de chanvre est un entre deux et présente une certaine inertie dû à une capacité thermique massique importante, bien que sa masse volumique soit inférieure aux pierres étudiées.

Il est donc question d'analyser l'impact du placement du béton de chanvre dans le complément d'isolation d'une paroi en pierre ainsi que les différentes combinaisons d'épaisseurs possibles, les types de combinaisons étudiées sont les suivantes :

- Isolation par l'extérieur
- Isolation par l'intérieur
- Mur double avec cavité d'air
- Mur double remplissage béton de chanvre

Isolation par l'extérieur :

Épaisseur (béton de chanvre /pierre) en cm :

- 5/30
- 10/30
- 15/30
- 5/40
- 10/40
- 15/40
- 5/50
- 10/50
- 15/50

Isolation par l'intérieur :

Épaisseur (pierre/ béton de chanvre) en cm :

- 30/5
- 30/10
- 30/15
- 40/5
- 40/10
- 40/15
- 50/5
- 50/10
- 50/15

Mur double avec cavité d'air :

Épaisseur (pierre/air/pierre) en cm :

- 20/5/20
- 20/10/20
- 20/15/20
- 30/5/30
- 30/10/30
- 30/15/30

Mur double avec remplissage béton de chanvre :

Épaisseur (pierre/béton de chanvre/pierre) en cm :

- 20/5/20
- 20/10/20
- 20/15/20
- 30/5/30
- 30/10/30
- 30/15/30

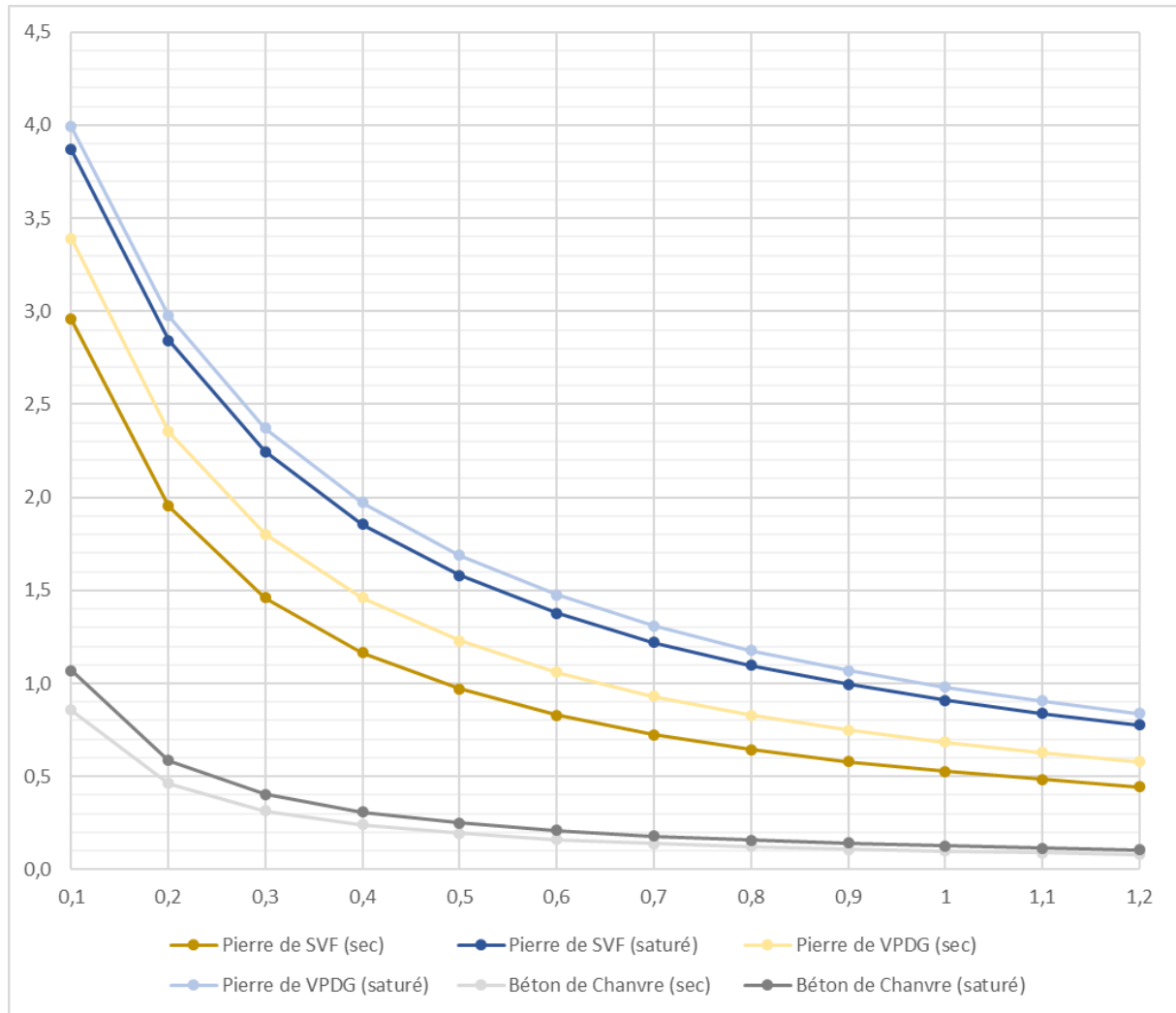


Figure 163 : Évolution du coefficient de déperdition thermique en fonction de l'épaisseur des deux pierres étudiées et du béton de chanvre (Source : Auteur)

	Densité ou masse volumique	Porosité	Capacité thermique	Conductivité thermique (sec)	Conductivité thermique (saturé en eau)	Facteur de résistance à diffusion de l'eau
	kg/m ³	%	J/kgK	W/mK	W/mK	.
Béton de Chanvre (mur)	420	70	1000	0,1	0,14	4,5

Figure 164 : Tableau des valeurs utilisées pour les simulations dans WUFI pour le béton de chanvre (Source : TRAN LE, 2010 et CEREZO, 2005)

5.1.8_ Isolation par l'extérieur

Cette première simulation de combinaison a pour but de montrer l'impact d'une isolation par l'extérieur en béton de chanvre d'un mur en pierre. Il est donc question de déterminer les épaisseurs idéales combinées afin d'atteindre le confort hygrothermique.

5.1.8.1_ Zone Nord-Ouest

Les simulations sont réalisées avec les combinaisons présentées dans la zone Nord-Ouest avec la pierre de Saint-Vaast-Fine.

Dans un premier temps, à l'échelle de l'année entière, comme le démontre la Figure 168, la différence est faible. De plus, l'ensemble des combinaisons rentre presque dans la zone d'acceptation définie précédemment.

La Figure 167 montre que la différence de la température de la surface intérieure minimale (hiver) est d'1°C entre la paroi 5/30 à 17,1°C et la paroi 15/50 à 18,2°C, tandis que la différence est de 0,3°C entre ces mêmes parois pour la température maximale (été).

La différence la plus importante se fait donc en hiver. La Figure 169 démontre que plus l'épaisseur de béton de chanvre est importante, au même titre que celle de la pierre, plus la température tend vers une valeur stable en été et vers une valeur plus élevée en hiver avec toujours une différence à l'échelle hebdomadaire. Cette variation d'épaisseur de béton de chanvre suit alors le fonctionnement de variation de l'épaisseur du mur de pierre. Pour autant, les valeurs de températures minimales sont bien plus élevées. En comparaison à la simulation précédente, 5cm de béton de chanvre permet de gagner 1,23°C sur la température minimale et de perdre 0,9°C sur la température maximale, l'équivalent de presque 25cm de pierre, le tout en gardant une certaine inertie et le même fonctionnement qu'un mur uniquement en pierre. La Figure 171 (Annexe 57) montre qu'à partir de 10cm de béton de chanvre (peu importe l'épaisseur du mur en pierre) la température de surface intérieure est toujours égale ou supérieure à 18°C (sauf pour certains cas les plus défavorables lors de la nuit d'hiver par exemple).

En revanche, que cela soit en été ou en hiver, la notion de déphasage thermique (en lien avec la température et le rayonnement solaire extérieurs) à l'échelle de la journée disparaît. La température devient presque stable et l'apport d'une hausse de température (et de rayonnement solaire) se fait

Combinaison	Épaisseur BC	Épaisseur SVF	R (sec)	U (sec)	R (saturé)	U (saturé)
cm/cm	m	m	m ² C/W	W/m ² C	m ² C/W	W/m ² C
5/30	0,05	0,3	1,18	0,84	0,83	1,20
10/30	0,1	0,3	1,68	0,59	1,21	0,82
15/30	0,15	0,3	2,18	0,46	1,60	0,63
5/40	0,05	0,4	1,36	0,74	0,92	1,08
10/40	0,1	0,4	1,86	0,54	1,31	0,76
15/40	0,15	0,4	2,36	0,42	1,69	0,59
5/50	0,05	0,5	1,53	0,65	1,02	0,98
10/50	0,1	0,5	2,03	0,49	1,40	0,71
15/50	0,15	0,5	2,53	0,40	1,79	0,56

Figure 165 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

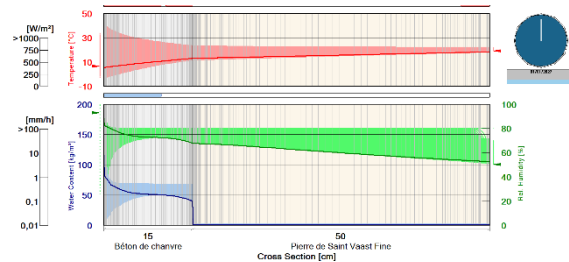


Figure 166 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 15/50 (Source : WUFI, auteur)

donc avec un temps de réponse bien plus important. Les graphiques étudiés permettent difficilement ici de mesurer l'inertie et la quantité d'énergie stockée dans la paroi car la différence de température à l'échelle d'une journée disparaît. Les variations de température pouvant être observées précédemment à l'échelle de la semaine évoluent vers des variations mensuelles pour à partir de 10cm de béton de chanvre et de 40cm de pierre. Les températures de surfaces intérieures en été sont très proches pour l'ensemble des combinaisons (Figure 170) et pleinement dans la zone de confort.

Les évolutions des valeurs de U et de R présentées par la Figure 165 montrent que le béton de chanvre permet d'atteindre des valeurs de U proches des valeurs couramment utilisées et recommandées pour une paroi, autour de 0,2 W/m²K. Néanmoins, les valeurs sont 2 à 4 fois plus élevées, oscillant entre 0,8 et 0,4 W/m²K pour une pierre sèche. Le béton de chanvre permet alors de considérablement améliorer le coefficient de déperdition thermique de la paroi et d'atténuer la différence entre une pierre humide et une pierre sèche.

Les graphiques présentés de l'Annexe 56 à l'Annexe 60 montrent que l'ensemble des combinaisons de pierre et de béton de chanvre permettent une bonne régulation hygrométrique, l'ensemble des humidités de surface intérieures étant dans la zone de confort.

	Surface Extérieure		5/30		5/40		5/50		10/30		10/40		10/50		15/30		15/40		15/50	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-2,89	17,39	17,11	51,00	17,43	50,79	17,67	50,66	17,66	50,82	17,84	50,68	17,99	50,60	17,95	50,70	18,07	50,61	18,17	50,55
Maximale	41,11	100,00	22,30	74,15	22,17	73,25	22,10	72,70	22,16	72,91	22,09	72,40	22,04	72,08	22,10	72,20	22,05	71,90	22,01	71,68

Figure 167 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

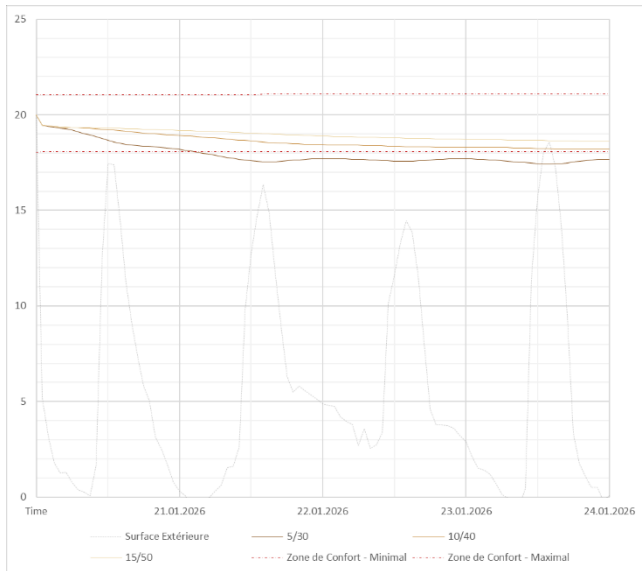


Figure 171 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

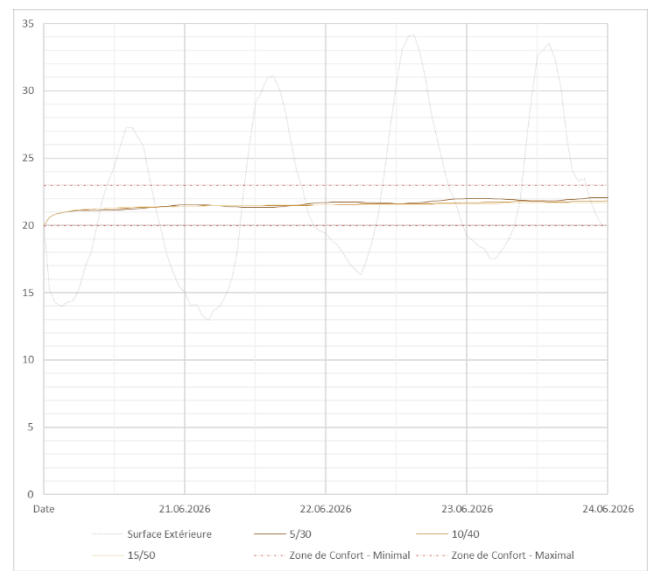


Figure 170 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

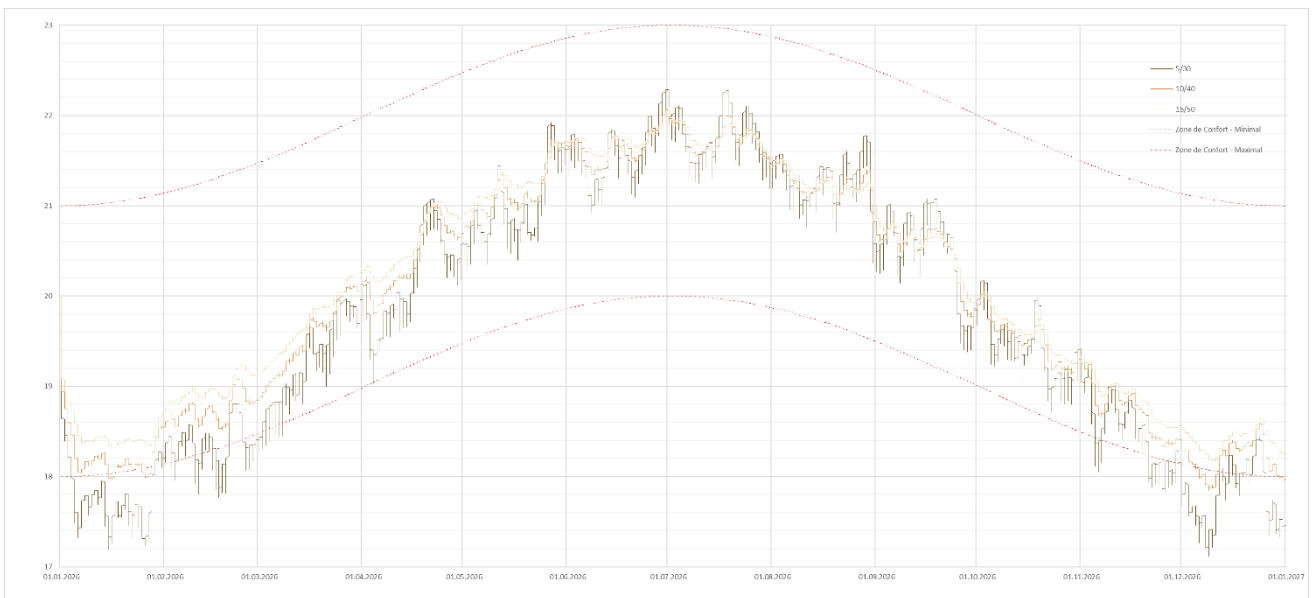


Figure 169 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

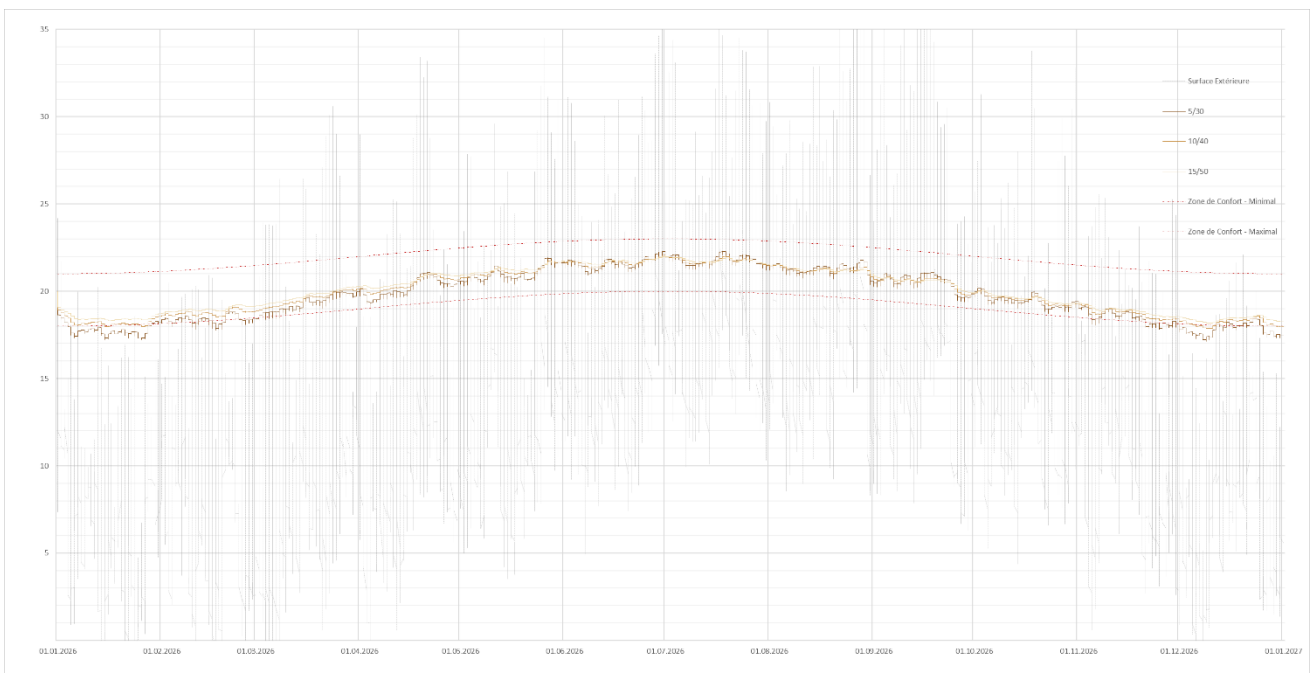


Figure 168 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

5.1.8.1_ Zone Sud-Est

Les simulations sont réalisées de manière identique avec les combinaisons présentées dans la zone Sud-Est avec la pierre de Vers-Pont-du-Gard.

Dans un premier temps, sur l'année entière, l'ensemble des températures de surfaces sont comprises dans la zone de confort à partir de 10cm de béton de chanvre et de 40cm de pierre de VPDG.

De la même manière que précédemment, la différence principale entre les combinaisons se fait en hiver car les déperditions thermiques sont fortement réduites. La Figure 176 démontre qu'en hiver l'ajout d'une épaisseur importante de béton de chanvre permet de considérablement augmenter la température de surface intérieure. Tandis qu'en été, la température se stabilise vers une valeur plus faible. En d'autres termes, l'ajout du béton de chanvre permet une réduction des variations de températures et plus à l'échelle des mois que des journées.

La Figure 178 montre qu'en hiver la température devient plus stable et plus élevée. A partir de 10cm de béton de chanvre, même avec 30cm de pierre, la température de surface intérieure est presque toujours supérieure à 19°C. En effet, la Figure 174 montre que la température minimale pour la paroi 10/30 est de 18,7°C aux conditions les plus défavorables, durant une nuit d'hiver.

La Figure 177 montre bien que durant l'été, la température se stabilise et ne présente plus de variations sauf pour les combinaisons avec seulement 5cm de béton de chanvre, ce qui semble donc insuffisant. La température est donc lissée et diminue légèrement avec l'augmentation de l'épaisseur de béton de chanvre.

La Figure 172 montre comme précédemment que le béton de chanvre permet de considérablement diminuer le coefficient de déperdition thermique des parois en pierres. Mais surtout, de réduire cette valeur au point que pour 15cm de béton de chanvre et 50cm de pierre, le coefficient thermique est presque identique entre l'utilisation de la pierre de SVF et la pierre de VDPG. Plus l'épaisseur de béton de chanvre est importante plus son impact importe sur le coefficient de déperdition thermique de la paroi et donc plus la conductivité thermique de la pierre devient un complément. L'expérience montre ici avec ces valeurs de U que le béton de chanvre permet de compléter l'isolation de la pierre et donc de minimiser l'impact du type de pierre

Combinaison	Épaisseur BC	Épaisseur VPDG	R (sec)	U (sec)	R (saturé)	U (saturé)
cm/cm	m	m	m ² C/W	W/m ² C	m ² C/W	W/m ² C
5/30	0,05	0,3	1,05	0,95	0,81	1,24
10/30	0,1	0,3	1,55	0,64	1,19	0,84
15/30	0,15	0,3	2,05	0,49	1,58	0,63
5/40	0,05	0,4	1,18	0,84	0,89	1,12
10/40	0,1	0,4	1,68	0,59	1,28	0,78
15/40	0,15	0,4	2,18	0,46	1,66	0,60
5/50	0,05	0,5	1,31	0,76	0,98	1,02
10/50	0,1	0,5	1,81	0,55	1,36	0,73
15/50	0,15	0,5	2,31	0,43	1,75	0,57

Figure 172 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

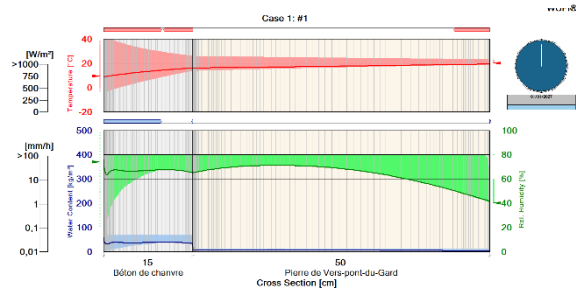


Figure 173 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 15/50 (Source : WUFI, auteur)

choisi par rapport à sa conductivité thermique. De plus, le béton de chanvre permet d'assurer une bonne isolation lorsque le taux d'humidité est important puisque sa conductivité thermique lorsqu'il est saturé en eau est de 0,14 W/mK.

Les graphiques présentés de l'Annexe 61 à l'Annexe 65 montrent que durant toute l'année, l'isolation par l'extérieur en béton de chanvre permet d'assurer une humidité de la surface intérieure toujours dans la zone de confort définie.

La Figure 166 et la Figure 173 montrent que le placement du béton de chanvre à l'extérieur l'expose à une forte variation de l'humidité et de température. La quantité d'eau présente dans le béton de chanvre varie fortement selon la zone et questionne sa capacité à réguler l'humidité. Néanmoins, il permet de réduire fortement l'amplitude de température dans la paroi en pierre et donc lisse fortement les variations de températures de surface. Il bloque notamment l'échauffement de la pierre en surface extérieure.

Le transfert d'humidité et de chaleur est continu entre les deux matériaux et ne cause pas de variations trop brutales pouvant amener à de la condensation. De plus, l'humidité traverse librement la paroi et s'équilibre naturellement entre intérieur et extérieur.

	Surface Extérieure		5/30		5/40		5/50		10/30		10/40		10/50		15/30		15/40		15/50	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-2,92	15,18	18,06	41,68	18,43	41,63	18,69	41,58	18,68	41,26	18,89	41,26	19,06	41,25	19,02	41,06	19,16	41,07	19,26	41,08
Maximale	43,05	100,00	23,73	61,59	23,51	61,07	23,42	60,71	23,41	61,04	23,34	60,72	23,27	60,48	23,30	60,75	23,25	60,52	23,20	60,36

Figure 174 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

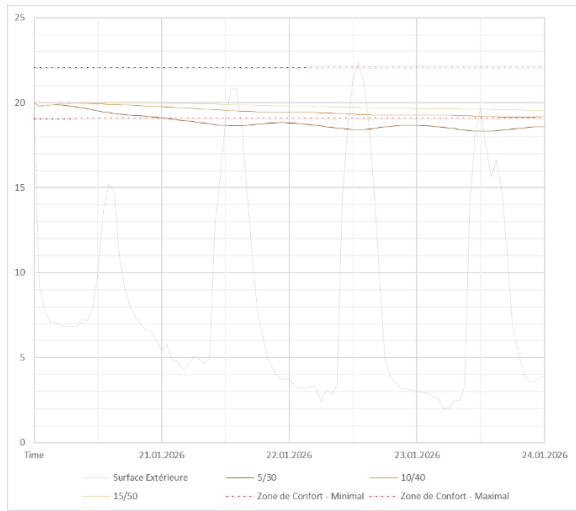


Figure 178 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

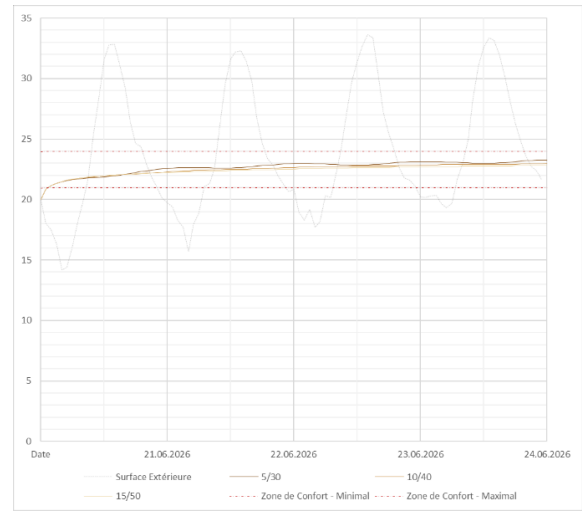


Figure 177 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

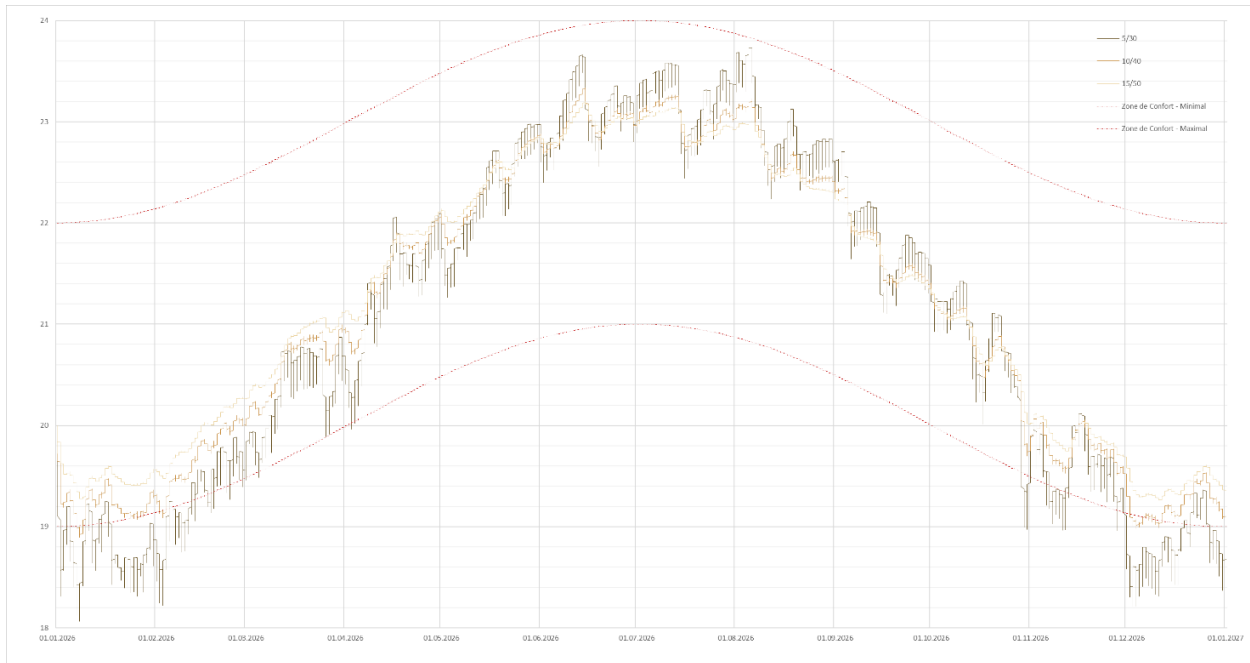


Figure 176 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

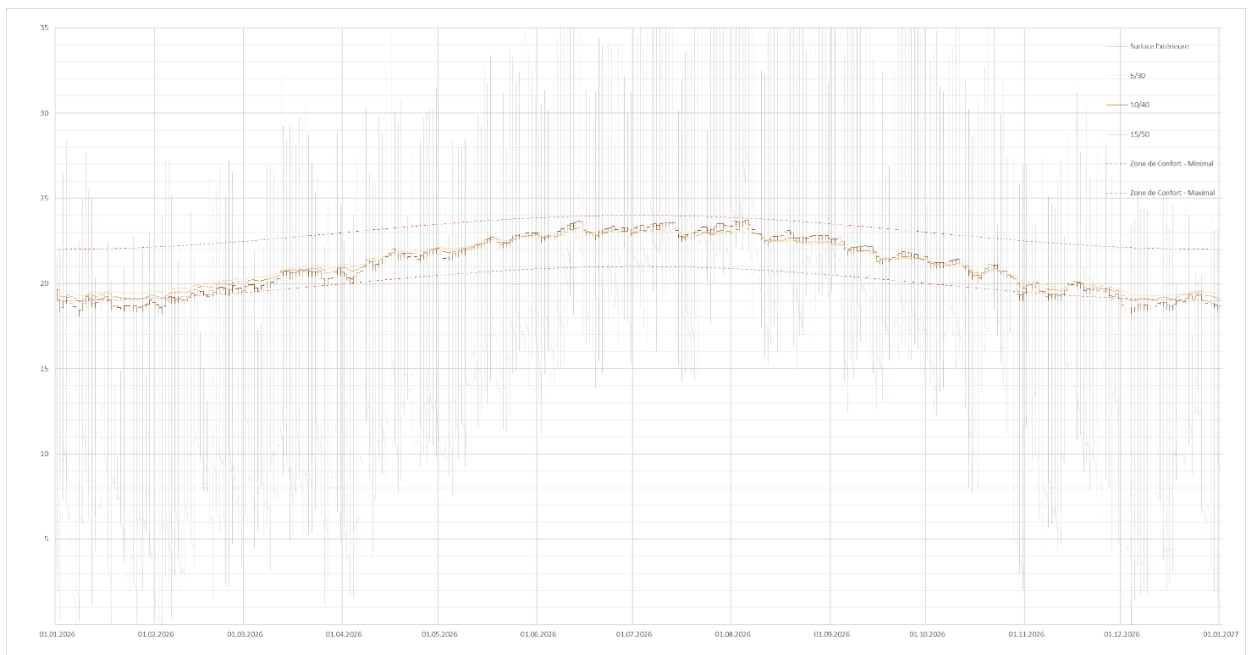


Figure 175 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

5.1.9_ Isolation par l'intérieur

Cette simulation à le même objectif que la précédente, mais cette fois, le béton de chanvre se situe en partie intérieure.

5.1.9.1_ Zone Nord-Ouest

Les simulations sont réalisées avec les combinaisons présentées (5.1.7) en opposition aux simulations d'isolation par l'extérieur, et ce, dans la zone Nord-Ouest avec la pierre de Saint-Vaast-Fine.

Dans un premier temps, la Figure 185 démontre de même, les valeurs sont presque toutes comprises dans la zone de confort et la Figure 184 montre que la différence la plus importante se fait encore une fois en hiver, la différence est tout de même importante.

La température minimale en hiver pour la paroi la plus fine avec 30cm de pierre et 5cm de béton de chanvre est de 17,2°C, tandis que pour la combinaison la plus épaisse avec 50cm de pierre et 15cm de béton de chanvre, la température minimale est de 18.1°C. La différence n'est que d'1,1°C. Pour la température maximale, elle passe de 22,3°C à 22°C (dans le même ordre). La situation est identique. Mise à part qu'une paroi avec 15cm de béton de chanvre placé à l'intérieur est moins efficace que placé à l'extérieur. Ici, pour les combinaisons avec 10cm de béton de chanvre, la température minimale reste en dessous de 18°C.

L'évolution de la température en hiver (Figure 183) et en été (Figure 182) traduit les mêmes conclusions que pour l'isolation par l'extérieur présenté juste précédemment. En effet, les valeurs de résistance et de déperditions thermiques sont les mêmes peu importe le sens. Les graphiques ci-contre montrent que les températures de la surface

intérieure évoluent de la même manière et ne diffèrent presque pas de l'isolation par l'extérieur.

La Figure 191 montre l'évolution de la température de l'humidité au sein de la paroi (d'une des combinaisons simulées) avec la plage de valeurs atteinte sur une année. La pierre régule lentement la température extérieure et rapidement l'humidité extérieure. Tandis que le béton de chanvre montre l'inverse.

L'isolation par l'intérieur permet une très faible variation du taux d'humidité dans la pierre mais une humidité importante qui stage autour des 80%. Tandis que dans l'isolation par l'extérieur, l'humidité dans la pierre descend plus souvent dans les 60%. Dans une zone où l'air est humide comme la zone Nord-Ouest, il est important de pouvoir diminuer le taux d'humidité dans le matériau.

Ces simulations permettent difficilement de mesurer la différence entre l'isolation par l'intérieur et l'isolation par l'extérieur.

Selon les graphiques en annexe (Annexe 69), l'isolation par l'intérieur permet aussi d'atteindre la zone de confort pour l'humidité de la paroi intérieure sur tout l'année. La courbe de l'humidité de la surface intérieure de la paroi s'inscrit parfaitement dans la zone de confort définie.

5.1.9.2_ Zone Sud-Est

Les simulations sont réalisées de manière identique avec les combinaisons présentées dans la zone Sud-Est avec la pierre de Vers-Pont-du-Gard.

La Figure 187 et la Figure 188 montrent que les variations sont faibles entre les combinaisons et que ces variations sont plus importantes en hiver comme pour les simulations précédentes.

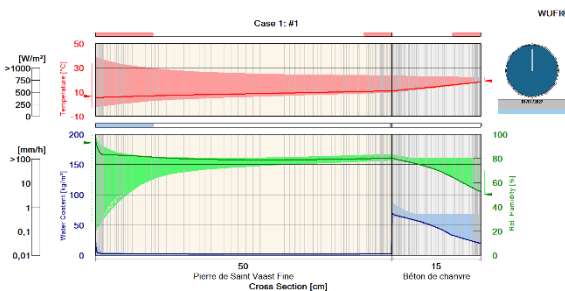


Figure 180 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 50/15 (Source : WUFI, auteur)

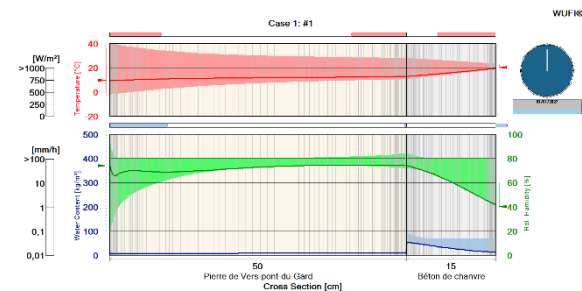


Figure 181 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 50/15 (Source : WUFI, auteur)

	Surface Extérieure		30/5		30/10		30/15		40/5		40/10		40/15		50/5		50/10		50/15	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-1,95	17,79	17,16	52,07	17,67	51,67	17,95	51,46	17,47	51,93	17,85	51,63	18,05	51,45	17,70	51,82	17,99	51,60	18,05	51,44
Maximale	38,64	100,00	22,29	73,82	22,15	72,58	22,09	71,90	22,14	73,03	22,08	72,19	22,04	71,66	22,07	72,52	22,03	71,90	22,01	71,46

Figure 179 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

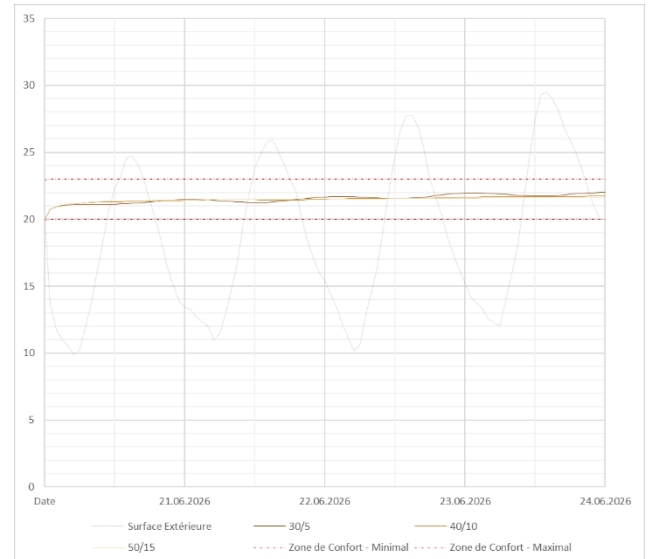
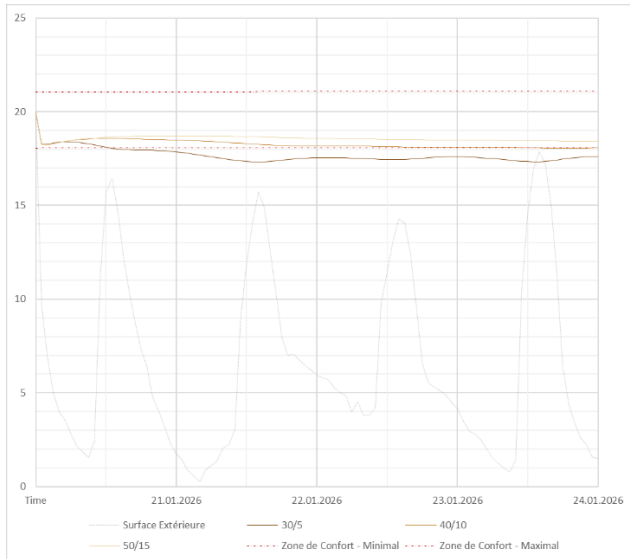


Figure 183 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

Figure 182 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Figure 184 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

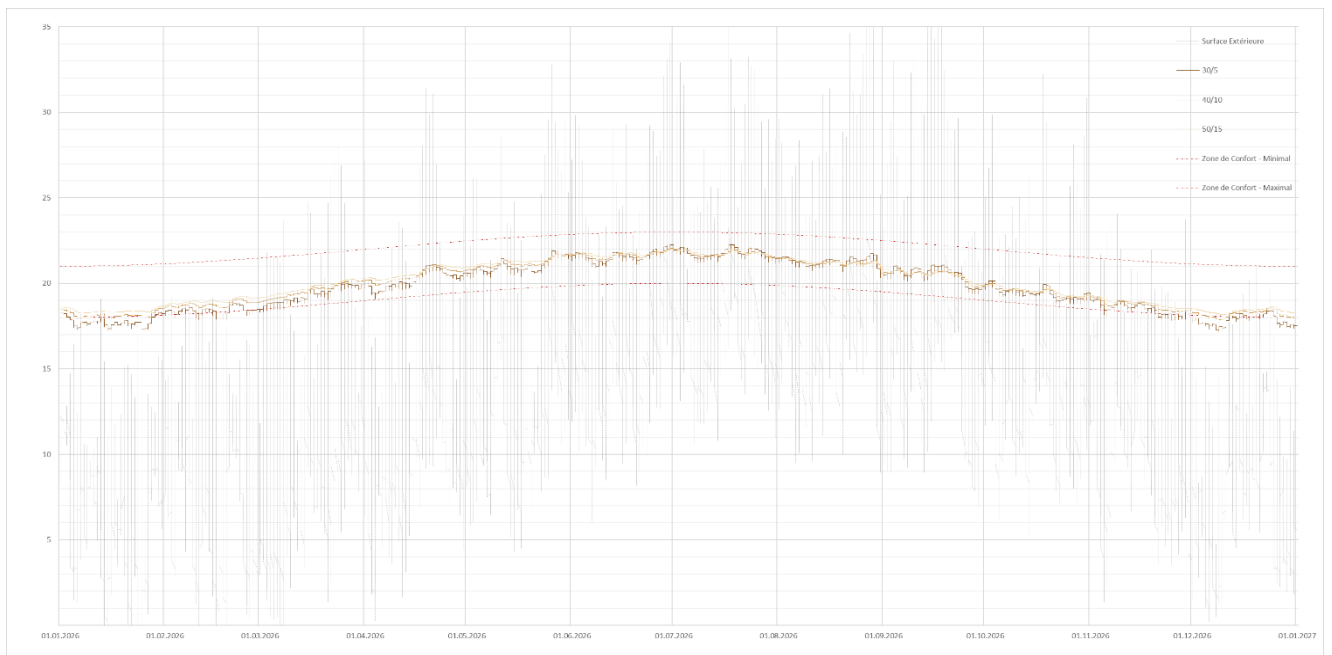


Figure 185 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

Les faibles valeurs données par la Figure 186 montrent une faiblesse dans les simulations qui font que l'ensemble des valeurs minimales équivalent aux premières heures de simulation car nous pouvons observer notamment dans la Figure 188 que la température de la surface intérieure d'une paroi de 50/15 ne descend jamais en dessous de 19,2°C.

Les valeurs maximales en été sont très proches, comprises entre 23,74°C pour la paroi 30/5 et 23,23°C pour la paroi 50/15. L'isolation en béton de chanvre ne permet pas de radicalement améliorer le confort d'été et réduit même les variations de températures à l'échelle de la journée. L'isolation par l'intérieur suit les mêmes principes que l'isolation par l'extérieur. Bien qu'ici, dans la zone Sud-Est, les températures de la surface intérieure sont légèrement inférieures en hiver aux températures de surface intérieure d'une paroi isolée par l'extérieur. La pierre étant à l'extérieur et n'étant pas chauffée par la température intérieure crée une plus grande déperdition de chaleur vers l'extérieur.

Dans cette zone et avec une pierre moins performante que pour la zone Nord-Ouest, la paroi isolée par l'intérieur permet tout de même d'avoir une température de surface intérieure comprise dans la zone de confort pour un ajout minimum de 10cm de béton de chanvre pour une épaisseur de pierre minimum de 30cm.

Les graphiques de l'Annexe 71 à l'Annexe 75 montrent que la régulation de l'humidité de la paroi isolée par l'intérieur en béton de chanvre permet d'obtenir des valeurs dans la zone de confort. La paroi régule parfaitement l'humidité entre l'intérieur et l'extérieur et ce de manière continue.

Général :

Ces simulations en 2D à l'échelle de la paroi permettent difficilement de comprendre la différence entre isolation par l'intérieur l'isolation par l'extérieur. Les résultats sont extrêmement proches, et ce, pour les deux zones.

L'isolation en béton de chanvre traduit dans un premier temps une isolation modérée de la paroi en pierre mais surtout de continuité hygrométrique entre les deux matériaux ne posant pas la question de la condensation à la jonction entre les deux matériaux car la température de change pas brusquement. En effet, les deux matériaux n'étant pas fortement isolant la température varie faiblement à l'instar des isolants classiques. Cette composition de paroi perspirante permet de laisser l'humidité se réguler naturellement sans devoir la stopper avec un pare-vapeur. La paroi épaisse devient alors stabilisatrice de la température et de l'humidité entre l'intérieur et l'extérieur.

	Surface Extérieure		30/5		30/10		30/15		40/5		40/10		40/15		50/5		50/10		50/15	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-1,41	17,09	18,00	41,78	18,28	41,32	18,27	41,20	18,29	41,70	18,28	41,32	18,27	41,21	18,29	41,63	18,27	41,31	18,26	41,21
Maximale	40,04	99,37	23,74	62,85	23,44	62,92	23,33	62,99	23,52	62,86	23,36	62,94	23,28	63,03	23,42	62,86	23,29	62,97	23,23	63,08

Figure 186 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

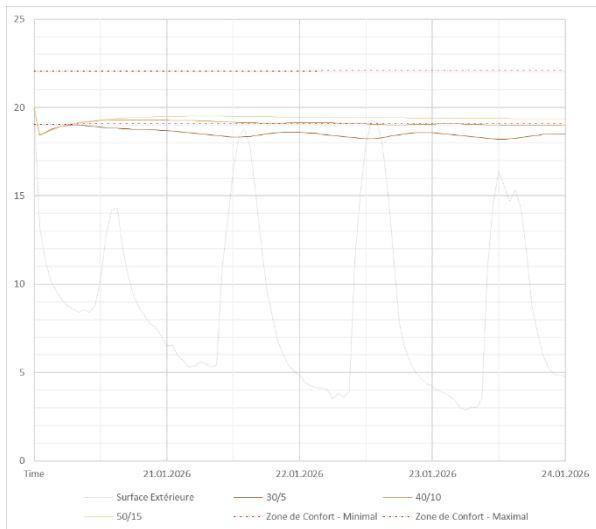


Figure 190 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

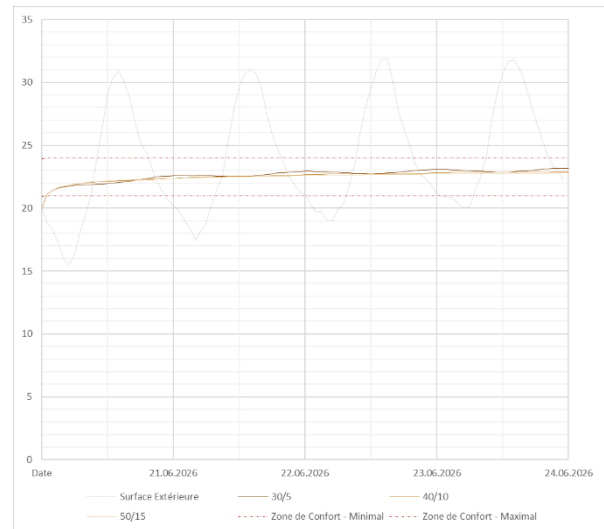


Figure 189 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

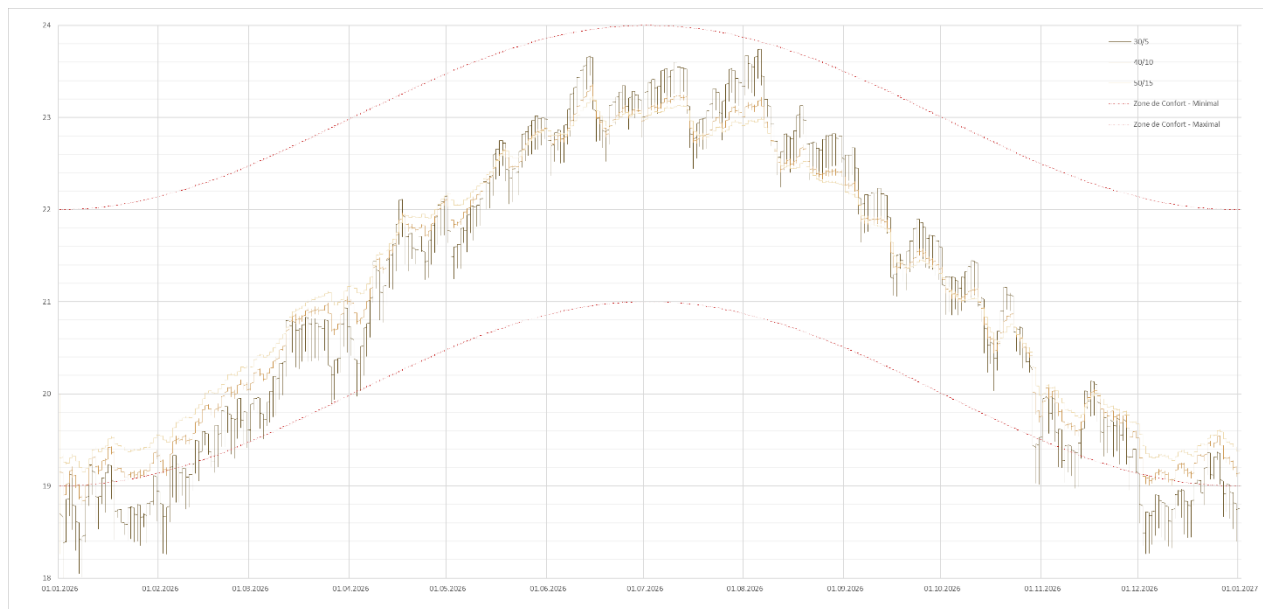


Figure 188 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

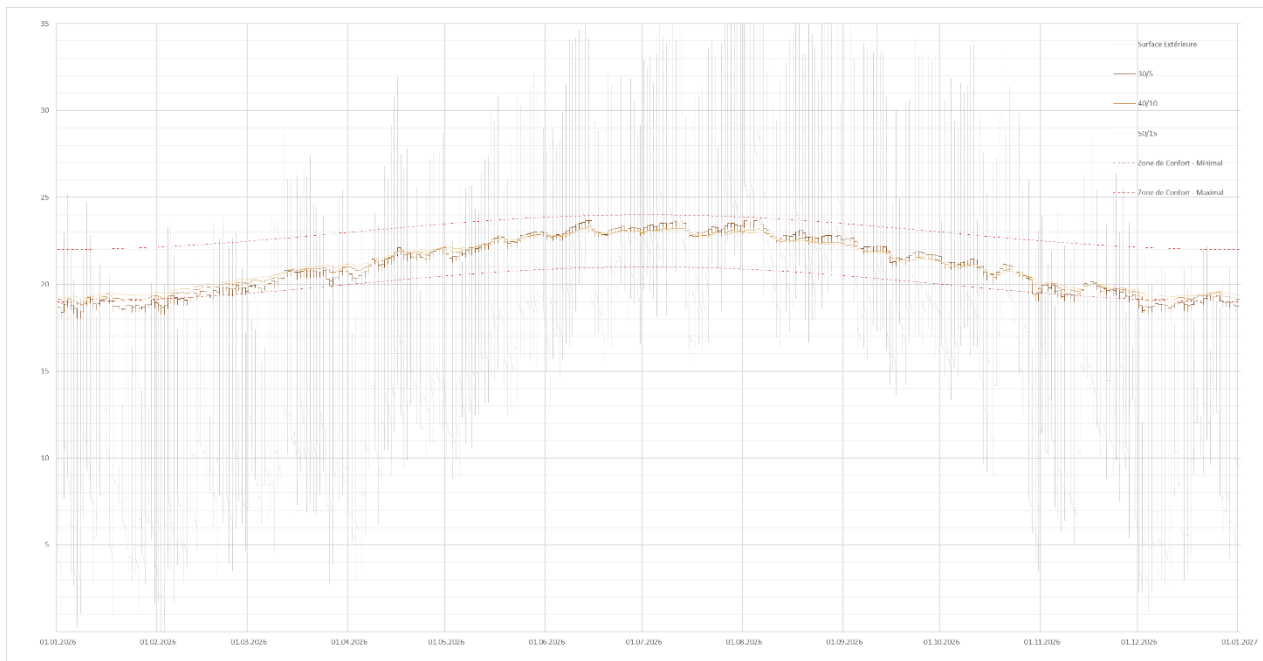


Figure 187 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

5.1.10_ Mur double avec cavité d'air

Cette simulation a pour but de comprendre l'impact de l'ajout d'une lame d'air (considérée fermée et donc non ventilée) entre deux parois en pierre.

L'air est très isolant et possède une conductivité thermique faible de 0,07 W/mK. Ne nécessitant aucune matière supplémentaire, l'air semble être une couche isolante intéressante.

5.1.10.1_ Zone Nord-Ouest

Les simulations sont réalisées avec les combinaisons présentées (5.1.7), et ce, dans la zone Nord-Ouest avec la pierre de Saint-Vaast-Fine.

Les parois en pierre variant de 20 à 30cm d'épaisseur de chaque côté et la lame d'air de 5 à 15cm. Dans un premier temps, nous observons (Figure 197) que les températures de surfaces intérieures se trouvent toutes dans la zone de valeurs acceptés sauf pour la combinaison la plus fine (20/5/20). De plus, la Figure 196 montre bien que les différences sont plus importantes en hiver qu'en été dans la même logique que les simulations précédentes.

En revanche, un phénomène assez nouveau apparait, plus la lame d'air est épaisse, plus son pouvoir isolant est efficace en hiver. Cependant, en été, les combinaisons avec les lames d'air plus épaisses son moins bien isolantes. La lame d'air permet en été d'éviter une transmission de chaleur trop importante lorsque la température extérieure grimpe mais diminue plus rapidement la température lorsque les températures baissent.

En hiver, l'on remarque que plus la lame d'air est épaisse plus son pouvoir isolant permet de remonter la température, jusqu'à avoir des valeurs assez élevées. L'épaisseur de la lame d'air impact bien plus que l'épaisseur de la pierre et ce grâce à faible conductivité thermique.

La différence de température minimale entre la paroi la plus fine et la paroi la plus épaisse est de 0,75°C et pour la température maximale de 0,14°C. Ces changements sont tout de même importants puisque plus la paroi est isolée plus les différences deviennent minimales.

De plus, on remarque que la différence entre une lame d'air de 5cm et de 10cm est bien plus

Combinaison cm/cm	Épaisseur SVF m	Épaisseur air m	Épaisseur SVF m	R (sec) m²C/W	U (sec) W/m²C	R (saturé) m²C/W	U (saturé) W/m²C
20/5/20	0,2	0,05	0,2	1,56	0,64	1,24	0,80
20/10/20	0,2	0,1	0,2	2,27	0,44	1,95	0,51
20/15/20	0,2	0,15	0,2	2,97	0,34	2,65	0,38
30/5/30	0,3	0,05	0,3	1,91	0,52	1,43	0,70
30/10/30	0,3	0,1	0,3	2,61	0,38	2,13	0,47
30/15/30	0,3	0,15	0,3	3,32	0,30	2,84	0,35

Figure 191 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

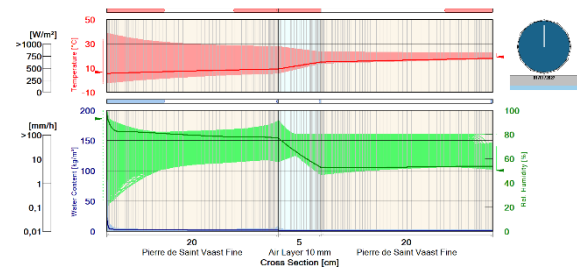


Figure 192 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 20/5/20 (Source : WUFI, auteur)

importante qu'entre 10cm et 15cm. La température minimale pour une combinaison avec des parois en pierre de 20cm et de 5cm d'air est de 17,7°C, de 18,11°C pour 10cm d'air et de 18,32°C pour 15cm d'air. Ceci s'explique par la non-linéarité du coefficient de déperdition thermique qui n'évolue que très peu avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi isolante. Il semble ne pas être utile d'aller au-delà de 10cm de lame d'air.

Un phénomène intéressant est montré par le zoom sur la Figure 195 (Annexe 77) qui est que l'épaississement de la lame d'air permet de limiter les déperditions thermiques en hiver sans pour autant modifier le temps de réponse intéressant d'environ 12h d'une paroi en pierre de 40cm non isolée. En effet, l'air ne permet pas de stocker suffisamment de chaleur pour impacter l'inertie du mur en pierre. Ceci est très intéressant quand on sait l'avantage du déphasage durant la période estivale et en mi-saison. En effet, les autres solutions passant par l'isolation avec un Isolant agrandissent trop ce déphasage au point qu'il devienne trop important.

De plus, les valeurs de U et de R sont légèrement inférieures à celles présentés dans les simulations précédentes d'isolation avec béton de chanvre.

Les graphiques présentés de l'Annexe 76 à l'Annexe 80 démontrent une gestion de l'humidité de la paroi très intéressante et comprise dans la zone de confort pour l'ensemble des combinaisons.

	Surface Extérieure		20/5/20		20/10/20		20/15/20		30/5/30		30/10/30		30/15/30	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-1,95	17,79	17,69	50,87	18,11	50,82	18,32	50,70	18,00	50,62	18,28	50,60	18,44	50,58
Maximale	38,64	100,00	22,18	72,87	22,12	71,92	22,10	71,45	22,07	72,06	22,05	71,45	22,04	71,12

Figure 193 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

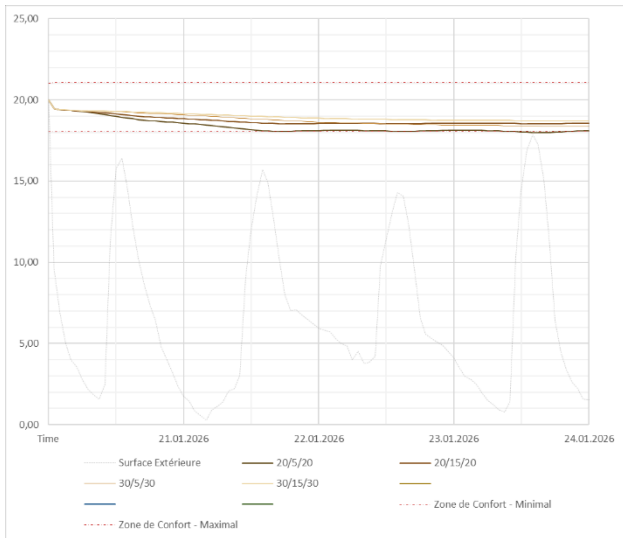


Figure 194 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

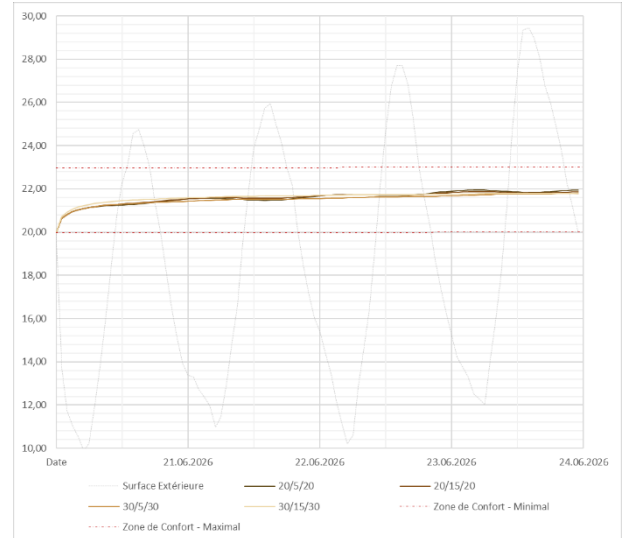


Figure 195 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

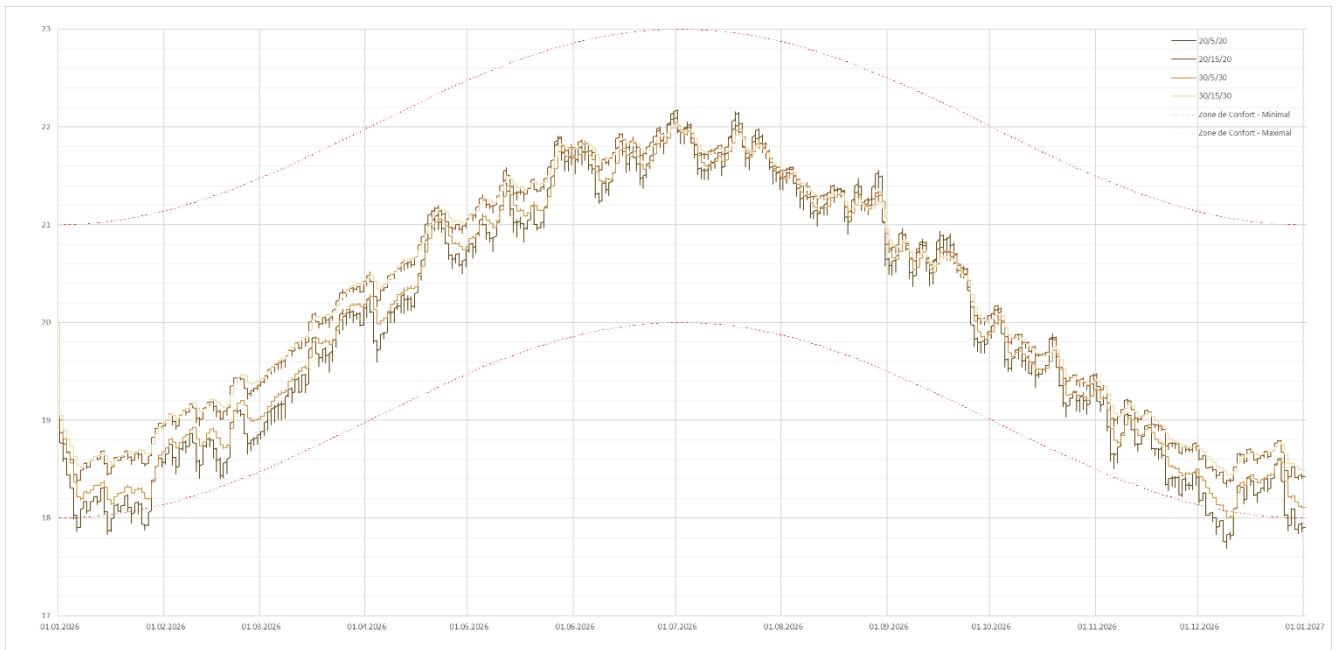


Figure 196 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

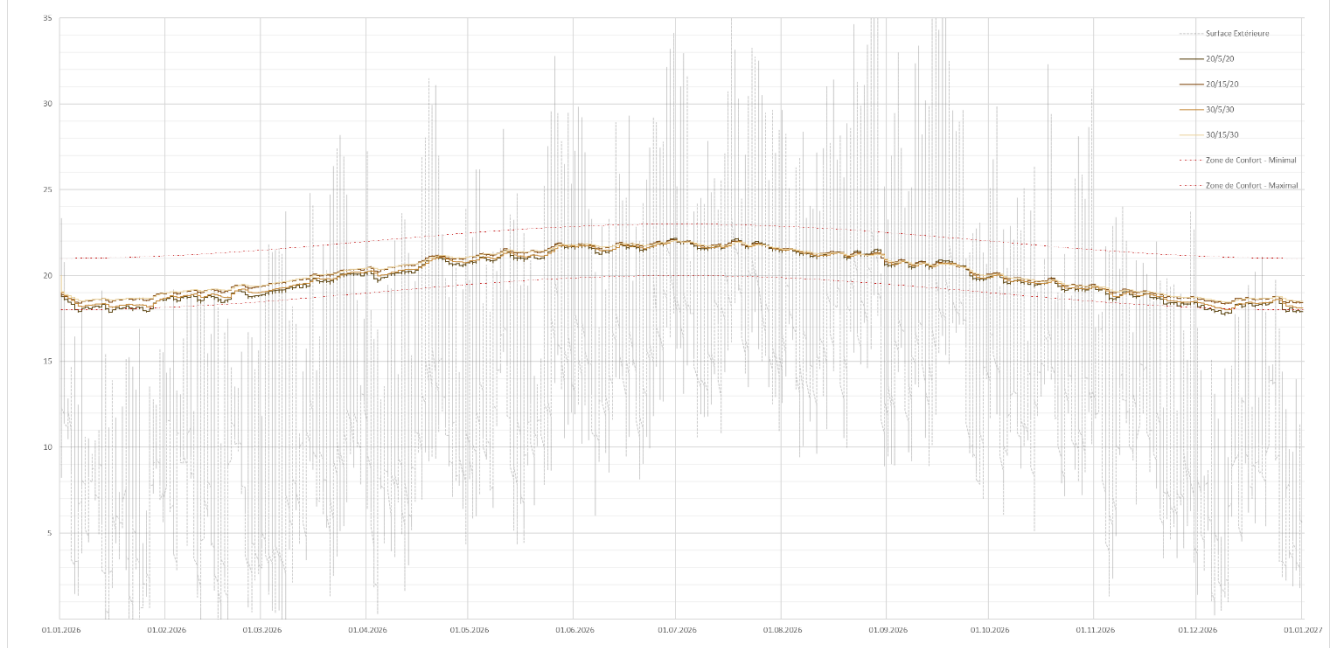


Figure 197 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

La Figure 192 montre par contre une forte variation de l'humidité dans la pierre et notamment à cause de la rupture causée par la lame d'air. Cependant le taux d'humidité n'atteint pas 100%. Il n'y a donc pas condensation dans la lame d'air.

5.1.10.2_ Zone Sud-Est

Les simulations sont réalisées de manière identique avec les combinaisons présentées précédemment dans la zone Sud-Est avec la pierre de Vers-Pont-du-Gard.

La Figure 201 montre que l'ensemble des valeurs est compris dans la zone de confort définie, sauf pour quelques jours, pour la combinaison la plus fine avec une lame d'air de 5cm et 20cm de pierre de part et d'autre.

La Figure 202 montre que la différence entre les combinaisons se fait surtout en hiver et que c'est l'épaisseur de la lame d'air qui importe le plus et qui 'dimensionne' le comportement thermique de la paroi. Le tableau (Figure 198) le démontre bien puisque pour 15cm de lame d'air, la valeur de U est presque identique avec deux parois de 20cm de part et d'autre et deux parois de 30cm, donnant une épaisseur 20cm de pierre en plus. Ceci indique bien que lors du dimensionnement d'une paroi de ce type, d'un point de vu thermique, l'épaisseur de la pierre importe peu.

En hiver, peu de différences à partir de 20/10/20, toutes les combinaisons sont très efficaces et donnent des valeurs de température de surface très importantes. En effet, les valeurs minimales passent de 18,72°C à 19,48°C de la plus fine à la plus épaisse combinaison (Figure 200). Et comme évoqué précédemment, plus on s'approche de la valeur de température de l'air intérieur, plus il est compliqué d'augmenter la température de surface intérieur. De plus, pour les parois avec deux fois 20cm de pierre, bien que la température de surface soit importante, il existe une faible variation de température à l'échelle de la journée caractéristique d'un déphasage d'environ 12h. Donc la température la plus faible de la paroi est atteinte lorsque la température intérieure est la plus importante.

En été, la température est inférieure pour des épaisseurs de pierres plus importantes uniquement mais pas pour une lame d'air plus épaisse. Ceci est dû au stockage de l'excès de chaleur permis par une paroi en pierre épaisse. Cependant, la paroi composée de deux fois 20cm de pierre présente comme en hiver un déphasage thermique

Combinaison cm/cm	Épaisseur VPDG m	Épaisseur air m	Épaisseur VPDG m	R (sec) m²C/W	U (sec) W/m²C	R (saturé) m²C/W	U (saturé) W/m²C
20/5/20	0,2	0,05	0,2	1,39	0,72	1,21	0,83
20/10/20	0,2	0,1	0,2	2,09	0,48	1,92	0,52
20/15/20	0,2	0,15	0,2	2,80	0,36	2,62	0,38
30/5/30	0,3	0,05	0,3	1,65	0,61	1,38	0,72
30/10/30	0,3	0,1	0,3	2,35	0,43	2,09	0,48
30/15/30	0,3	0,15	0,3	3,06	0,33	2,79	0,36

Figure 198 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

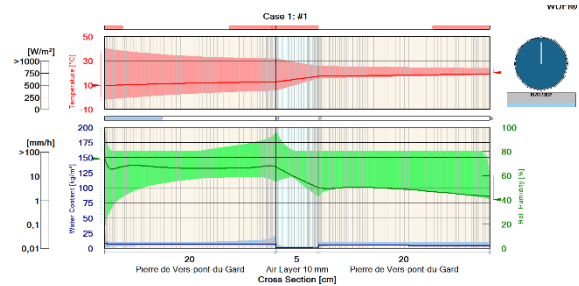


Figure 199 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 20/5/20 (Source : WUFI, auteur)

intéressant de 12h (Figure 203 et Annexe 81). Ce temps de réponse est idéal pour le confort d'été. De plus, entre les différentes solutions, la variation de la température de surface intérieure maximale est plus faible, de 0,27°C, avec 23,47°C pour la combinaison 20/5/20 et 23,2°C pour la combinaison 30/15/30 (Figure 200).

Les graphiques de l'Annexe 81 à l'Annexe 85 montrent que la paroi gère parfaitement l'humidité et permet d'être dans la zone de confort, et ce, pour l'ensemble des combinaisons.

Par ailleurs, la Figure 199 montre que l'humidité dans la pierre et dans la lame d'air (pour la combinaison la plus 'défavorable') varie fortement et s'approche des 100% d'humidité côté lame d'air de la paroi en pierre en contact avec l'extérieur. Ceci montre que la paroi en lien avec l'extérieur doit être dimensionnée afin d'éviter tout risque de condensation dans la lame d'air, pouvant nuire à la longévité du mur.

Général : La combinaison avec la lame d'air est une solution très intéressante qui permet de limiter les déperditions en hiver et pour autant de conserver un déphasage intéressant. De plus, dans l'optique d'un mur double bioclimatique, la lame d'air pourrait être ventilée en été et fermée en hiver, permettant de limiter l'apport de chaleur en été et de la conserver en hiver.

Cependant, les épaisseurs simulées peuvent ne s'avérer que peu réaliste d'un point de vue structurel.

	Surface Extérieure		20/5/20		20/10/20		20/15/20		30/5/30		30/10/30		30/15/30	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-1,78	17,21	18,72	41,26	19,14	40,86	19,34	40,65	19,06	41,24	19,34	40,90	19,48	40,71
Maximale	40,07	99,33	23,47	61,09	23,32	60,74	23,25	60,59	23,34	60,56	23,25	60,39	23,20	60,31

Figure 200 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

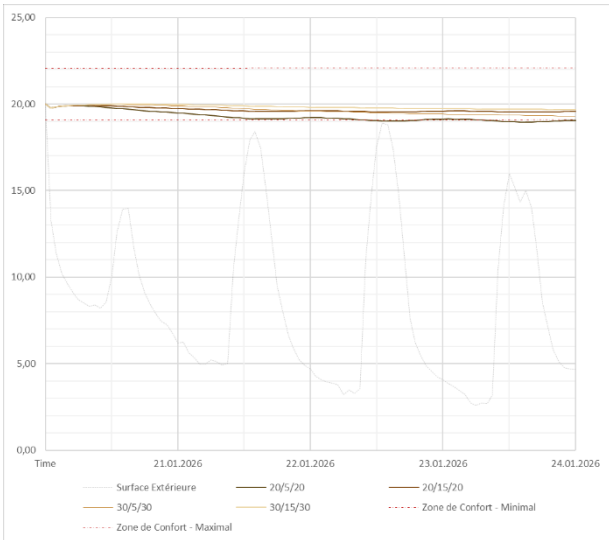


Figure 204 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

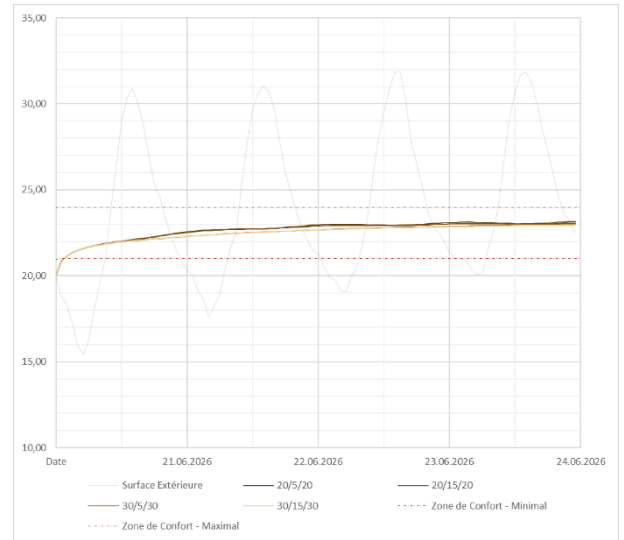


Figure 203 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

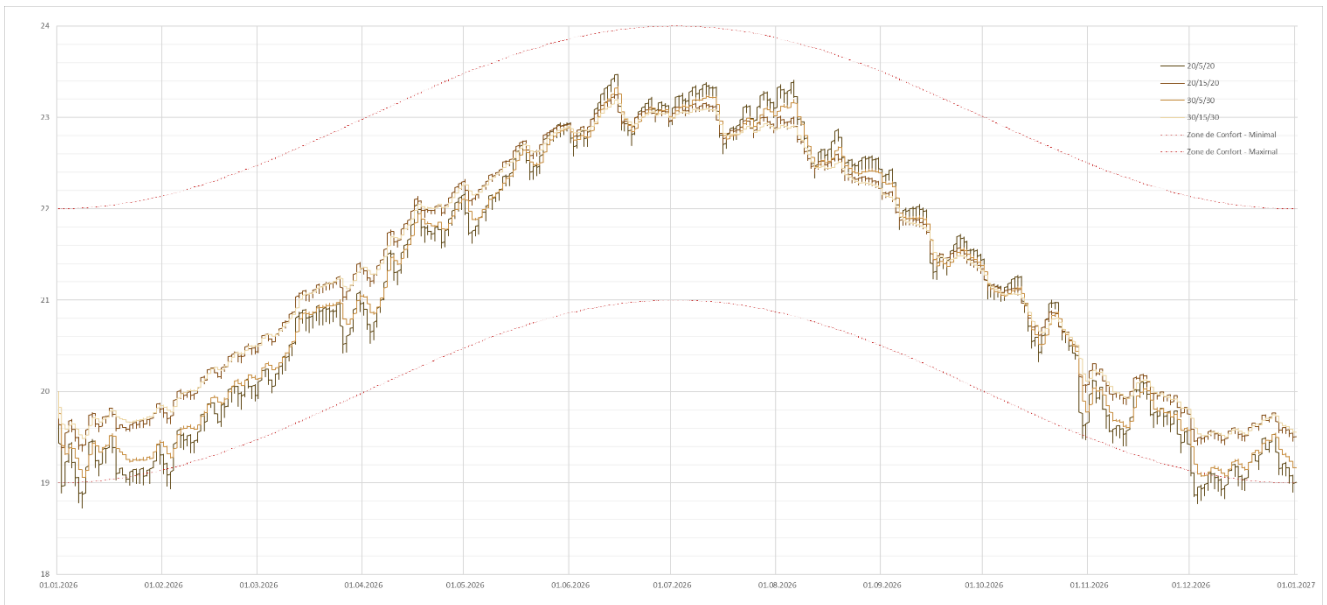


Figure 202 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

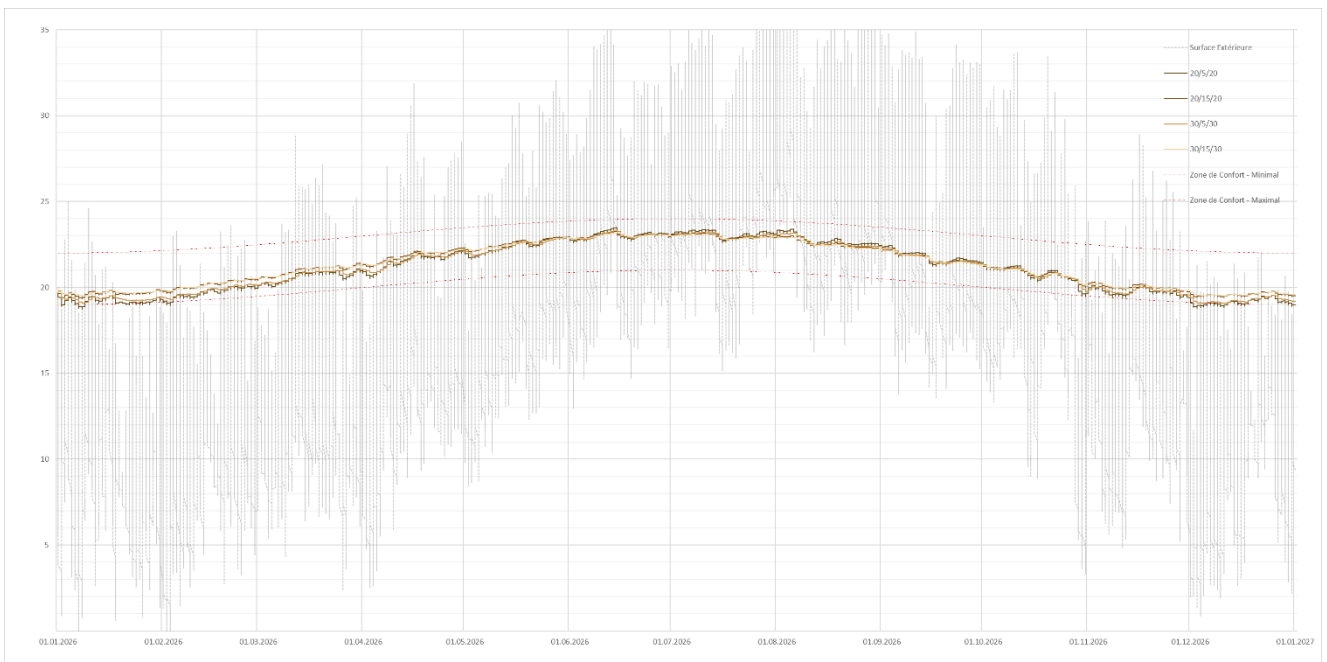


Figure 201 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

5.1.11_ Mur double avec remplissage en béton de chanvre

Cette simulation a pour but de compléter la simulation précédente en remplissant cette lame d'air avec du béton de chanvre. Il est donc intéressant de voir si le béton de chanvre en milieu de paroi diffère d'une isolation par l'intérieur ou par l'extérieur et s'il présente des avantages par rapport à un mur double avec lame d'air.

5.1.11.1_ Zone Nord-Ouest

Les simulations sont réalisées comme précédemment, et ce, dans la zone Nord-Ouest avec la pierre de Saint-Vaast-Fine et un remplissage en béton de chanvre.

Dans un premier temps, et comme pour les simulations avec la cavité d'air, l'ensemble des valeurs sont comprises dans la zone de confort (Figure 210). Sauf pour la combinaison la plus fine avec deux épaisseurs de 20cm de pierre et 5cm de béton de chanvre. La Figure 211 permet d'observer une différence entre les combinaisons durant la période hivernale.

En hiver, les variations semblent minimales sur la Figure 208, néanmoins, un zoom sur les valeurs (Annexe 88) permet de visualiser une différence importante entre les combinaisons simulées. Les parois 20/15/20 et 30/5/30 sont quasiment équivalentes. Ici, 10cm de béton de chanvre équivaut à environ 20cm de pierre. La Figure 207 montre que les températures minimales sont proches, avec 17,77°C et 17,80°C (dans le même ordre). On observe une différence de 0,6°C entre les températures minimales de surface intérieure (une nuit d'hiver) avec 17,37°C pour 20/5/20 et 18,2°C pour 30/15/30.

En été, le déphasage devient très important donc les températures intérieures varient très peu. Les différences sont bien plus minimales qu'en hiver. La Figure 207 montre que la différence entre les températures maximales atteintes par la surface intérieure ne s'espacent que de 0,2°C. La paroi 20/5/20 monte jusqu'à 22,2°C et la paroi 30/15/30 monte jusqu'à seulement 22°C.

De plus, les valeurs de U et de R présentées par la Figure 205 sont faibles en comparaison aux simulations précédentes. Bien que ces valeurs

Combinaison	Épaisseur SVF cm	Épaisseur BC m	Épaisseur SVF m	R (sec) m²C/W	U (sec) W/m²C	R (saturé) m²C/W	U (saturé) W/m²C
20/5/20	0,2	0,05	0,2	1,36	0,74	0,92	1,08
20/10/20	0,2	0,1	0,2	1,86	0,54	1,31	0,76
20/15/20	0,2	0,15	0,2	2,36	0,42	1,69	0,59
30/5/30	0,3	0,05	0,3	1,70	0,59	1,11	0,90
30/10/30	0,3	0,1	0,3	2,20	0,45	1,49	0,67
30/15/30	0,3	0,15	0,3	2,70	0,37	1,88	0,53

Figure 205 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

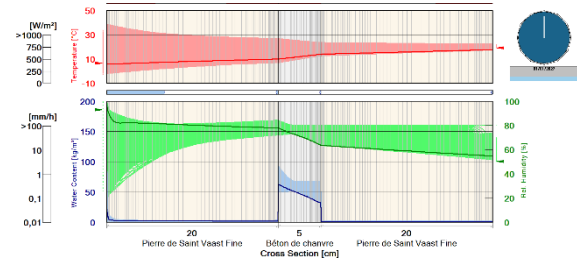


Figure 206 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 20/5/20 (Source : WUFI, auteur)

soient éloignées des valeurs usuelles de l'architecture contemporaine, elles permettent de fortement limiter les déperditions en hiver. Ces valeurs sont aussi proches des valeurs précédentes avec la cavité d'air, malgré que la différence soit plus importante pour une paroi saturée en eau.

La Figure 185 montre une variation importante de l'humidité au sein de la paroi. Comme précédemment, les faibles épaisseurs de pierre ne permettent pas stabiliser le taux d'humidité dans la paroi. En revanche, le béton de chanvre permet de mieux réguler l'humidité qu'une cavité d'air.

Les graphiques présentés de l'Annexe 86 à l'Annexe 90 montrent encore une fois que l'ensemble des combinaisons permettent de réguler correctement l'humidité de la surface de la paroi intérieure.

	Surface Extérieure		20/5/20		20/10/20		20/15/20		30/5/30		30/10/30		30/15/30	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-1,95	17,79	17,37	50,82	17,77	50,73	17,77	50,73	17,80	50,60	18,04	50,56	18,21	50,53
Maximale	38,64	100,00	22,21	73,67	22,14	72,63	22,14	72,63	22,08	72,53	22,05	71,95	22,02	71,60

Figure 207 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

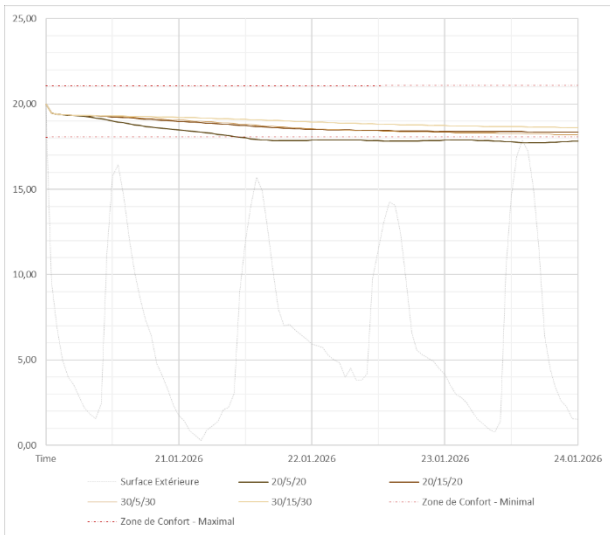


Figure 208 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

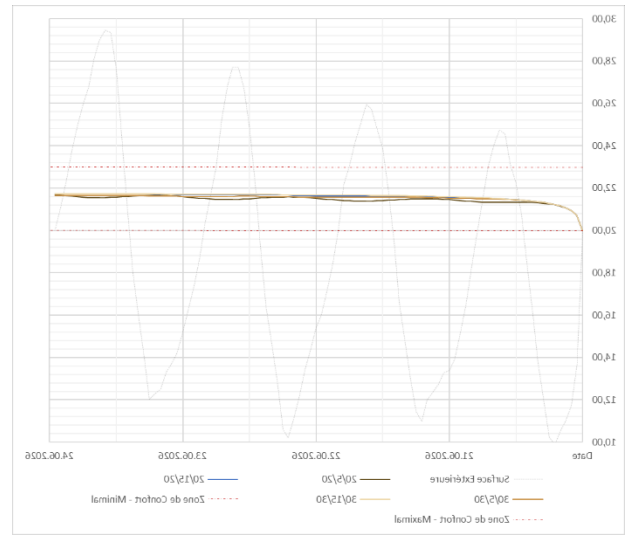


Figure 209 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

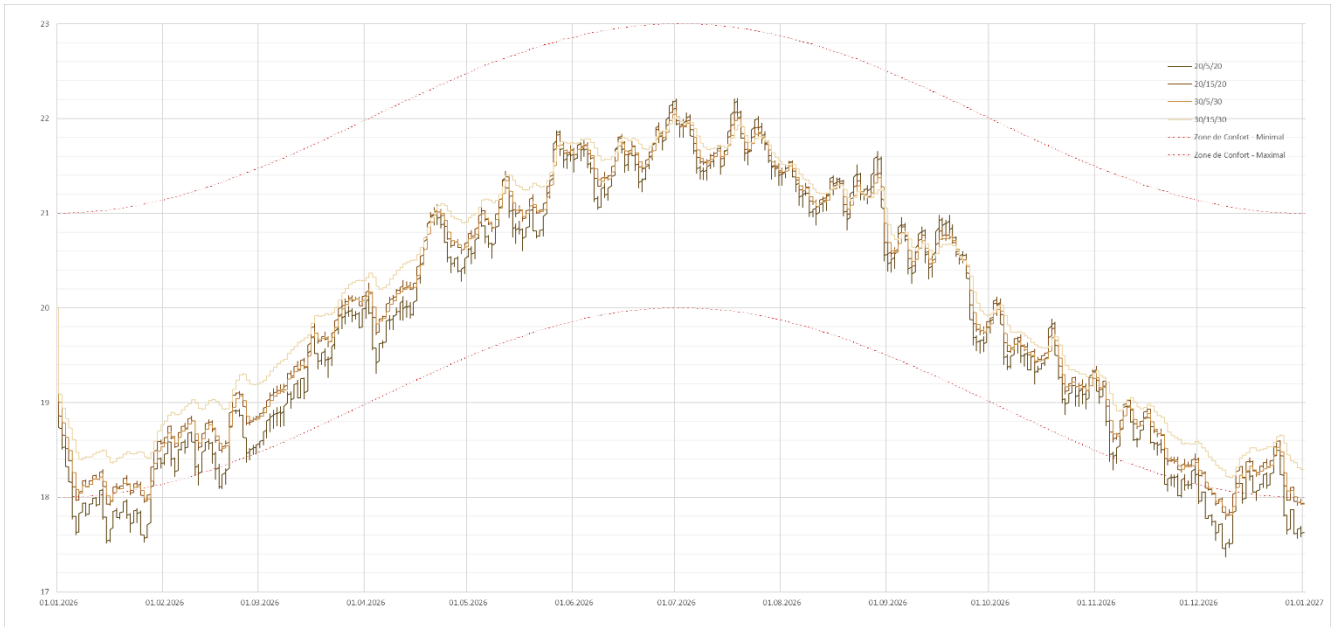


Figure 211 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

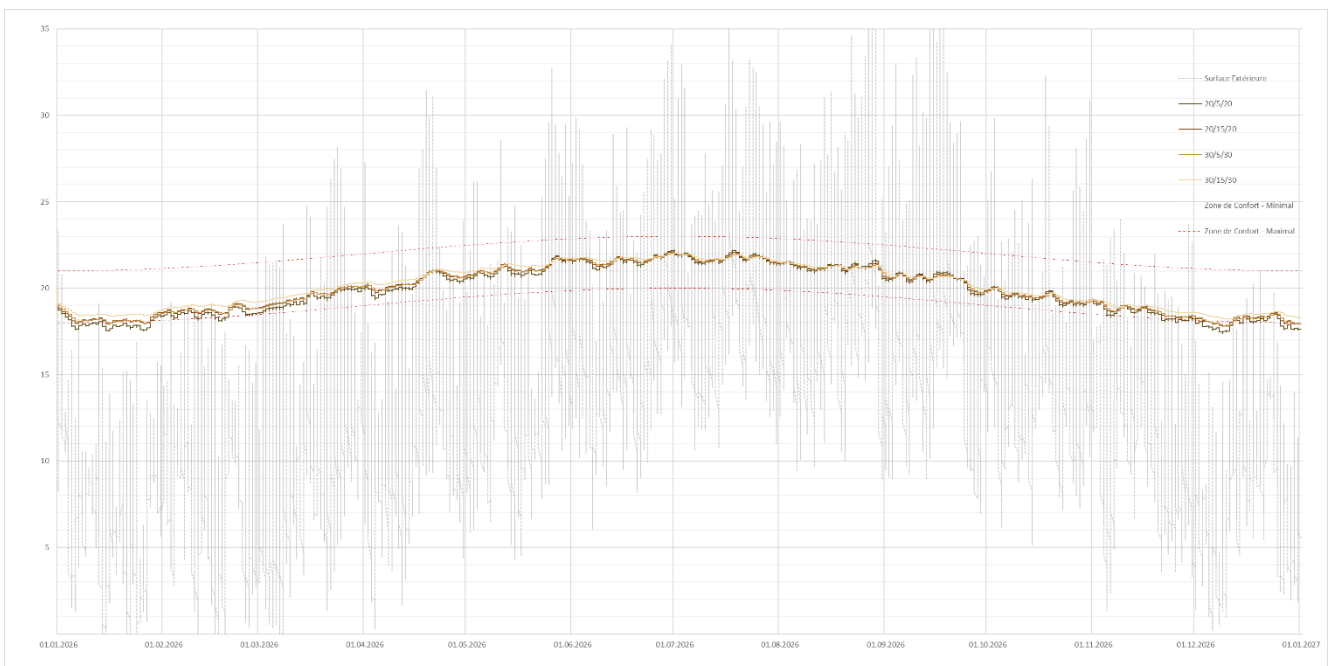


Figure 210 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

5.1.11.2_ Zone Sud-Est

Les simulations sont réalisées de manière identique avec les combinaisons présentées précédemment dans la zone Sud-Est avec la pierre de Vers-Pont-du-Gard.

Dans cette zone, les combinaisons en mur double avec remplissage par béton de chanvre sont moins efficaces. La Figure 215 montre que plusieurs parois sont en dessous et alignées à la limite inférieure de la zone de confort définie (à 19°C en hiver pour cette zone). Les différences sont importantes en hiver et au printemps pour les différentes combinaisons. Durant l'été et l'automne, les différences se traduisent uniquement par des variations plus importantes au cours des semaines.

La Figure 216 montre qu'ici la différence entre les parois est belle est bien faite par l'épaisseur en béton de chanvre comme pour la paroi avec la cavité d'air. Les parois ne permettant pas d'être constamment dans la zone de confort en hiver sont celles avec seulement 5cm de béton de chanvre.

Dans la zone précédente les parois 20/15/20 et 30/5/30 étaient principalement similaires, ici, elles sont bien différentes. La Figure 214 le montre car les valeurs de températures de surfaces minimales sur l'année sont bien différentes. La paroi 20/15/20 descend uniquement jusqu'à 19,11°C tandis que la paroi 30/5/30 peut descendre jusqu'à 18,8°C. Cette différence de résultat par rapport à la zone précédente peut s'expliquer par la différence de conductivité entre les deux pierres des deux zones. Ici, la différence entre le béton de chanvre et la pierre de VPDG est plus importante, le béton de chanvre est alors plus responsable du pouvoir isolant de la paroi. De plus, la gestion de l'humidité est différente. Dans le sud de la France, l'humidité étant moins présente dans l'air, les matériaux de la paroi sont moins souvent 'saturés' et conservent donc leur meilleure conductivité thermique. La différence étant alors plus importante entre béton de chanvre et la pierre.

De plus, la différence entre les combinaisons (températures minimales) est ici de 0,9°C avec 18,37°C pour la paroi 20/5/20 et 19,28°C pour la paroi 30/15/30.

La Figure 212 montre bien des valeurs de U sont 50% plus importantes que pour la zone précédente, et ce impliqués par la plus faible conductivité de la pierre de VPDG. Ceci montre bien que la pierre a tout de même un impact important sur la valeur de

Combinaison cm/cm	Épaisseur VPDG m	Épaisseur BC m	Épaisseur VPDG m	R (sec) m²C/W	U (sec) W/m²C	R (saturé) m²C/W	U (saturé) W/m²C
20/5/20	0,2	0,05	0,2	1,18	0,84	0,89	1,12
20/10/20	0,2	0,1	0,2	1,68	0,59	1,28	0,78
20/15/20	0,2	0,15	0,2	2,18	0,46	1,66	0,60
30/5/30	0,3	0,05	0,3	1,44	0,69	1,06	0,94
30/10/30	0,3	0,1	0,3	1,94	0,51	1,45	0,69
30/15/30	0,3	0,15	0,3	2,44	0,41	1,83	0,55

Figure 212 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)

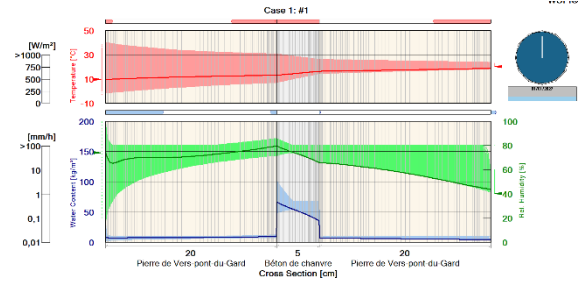


Figure 213 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 20/5/20 (Source : WUFI, auteur)

U de la paroi finale. Malgré une proximité de la température de l'air intérieure en hiver, la Figure 217 montre une différence entre les combinaisons simulées. Le zoom sur ces valeurs (Annexe 93) permet de bien visualiser la différence plus signifiante entre la paroi 30/5/30 et 20/15/20.

En été, les valeurs sont toujours aussi proches les unes des autres (Figure 218). Au même titre que dans la zone Nord-Ouest, les températures deviennent très stables à l'échelle de la journée avec un temps de réponse important. Les variations de températures se font principalement à l'échelle d'une semaine.

La Figure 214 montre une différence tout de même importante entre les températures de surfaces intérieures maximales de 0,6°C entre les combinaisons. Ce tableau permet de montrer qu'ici une paroi 20/10/20 semble correspondre à la paroi 30/5/30. Il semble alors que dans cette zone pour cette combinaison, 5cm de béton de chanvre correspondre à 20cm de pierre lors des conditions les plus défavorables.

Enfin, la Figure 213 montre que le taux d'humidité dans la pierre varie fortement mais n'approche pas suffisamment les 100% d'humidité pour observer un risque de condensation au sein de la paroi. Les graphiques sur l'humidité (Annexe 92, Annexe 94 et Annexe 95) permettent comme précédemment de démontrer une bonne gestion de l'humidité de surface intérieure des parois simulées.

	Surface Extérieure		20/5/20		20/10/20		20/15/20		30/5/30		30/10/30		30/15/30	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Minimale	-1,56	17,21	18,37	41,64	18,84	41,29	19,11	41,09	18,84	41,51	19,11	41,24	19,28	41,06
Maximale	40,01	98,98	23,65	61,39	23,44	60,89	23,34	60,63	23,42	60,69	23,32	60,46	23,25	60,36

Figure 214 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

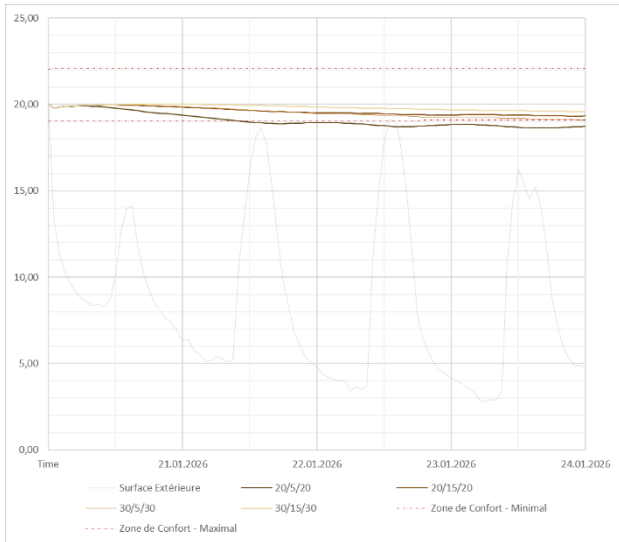


Figure 217 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

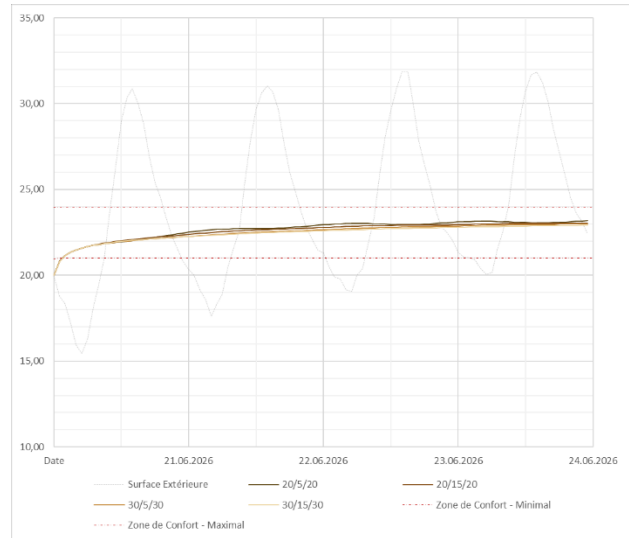


Figure 218 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

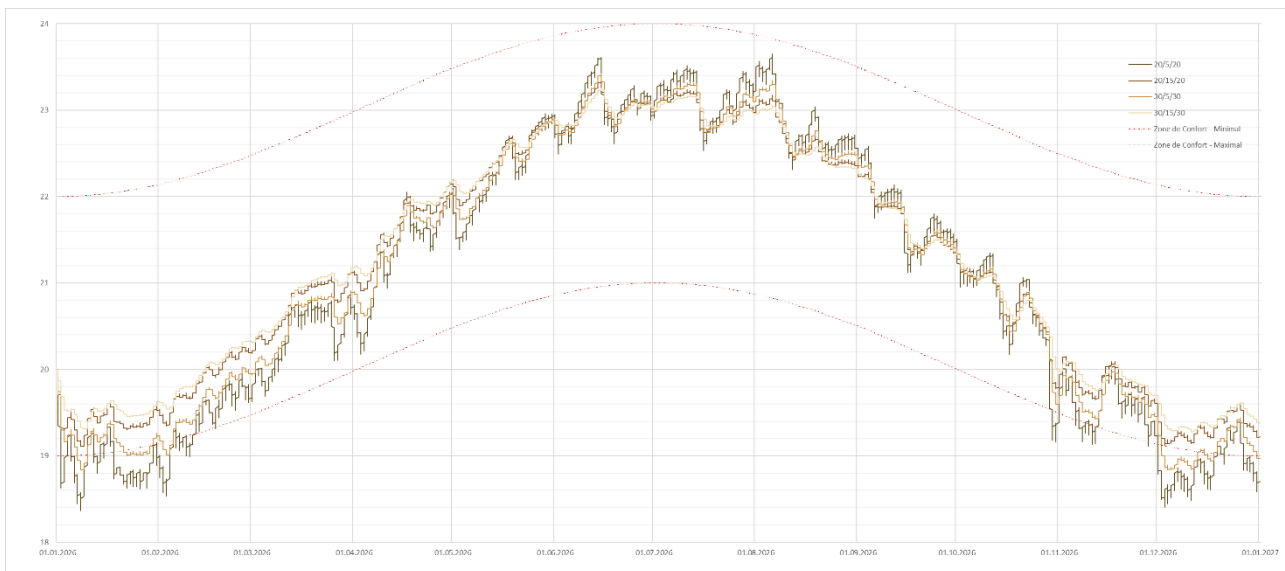


Figure 216 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

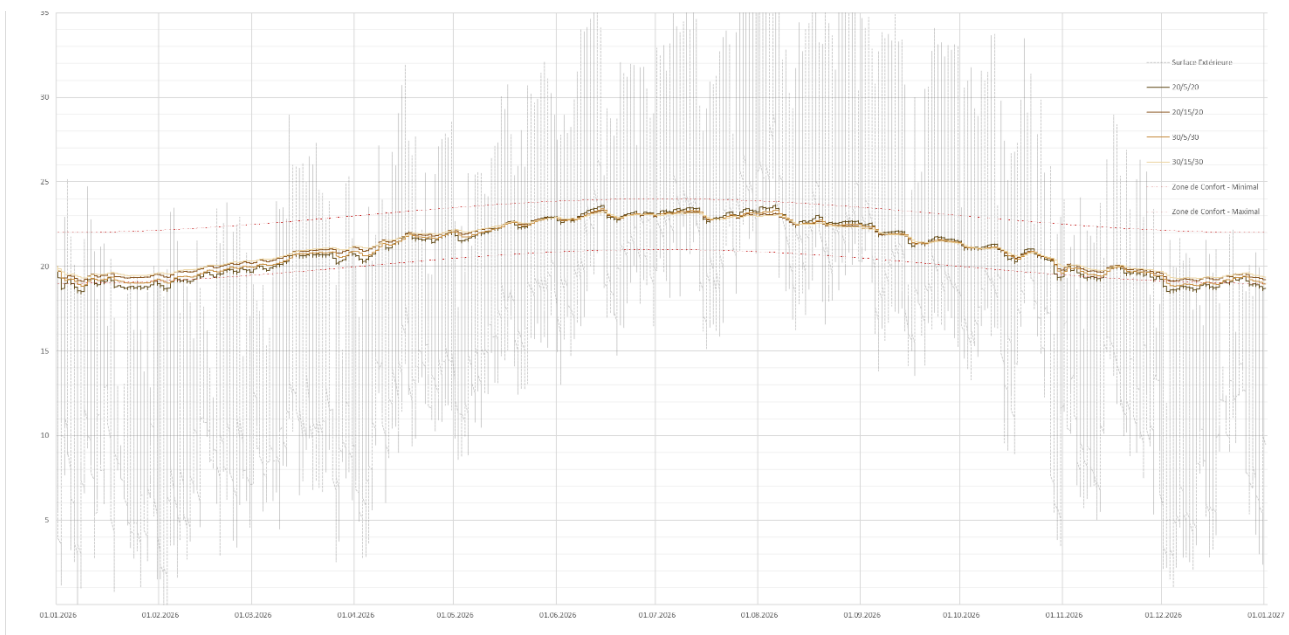


Figure 215 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

5.1.12_ Conclusion sur les transferts hygrothermiques à l'échelle de la paroi

Afin de conclure sur l'ensemble, il conviendra donc de revenir rapidement sur chaque simulation pour en rappeler les conclusions principales avant de conclure pour chaque zone et de manière générale pour ces expériences.

Dans un premier temps, la comparaison entre les différents types de pierres utilisées pour la construction en France a permis de démontrer que chaque pierre possédant des caractéristiques (physiques, thermiques et hydriques) très différentes, les comportements sont inégaux. A épaisseur égale, la pierre de calcaire tendre est la plus performante tant sur le confort d'été que d'hiver. Sa plus faible conductivité thermique lui permet de fortement limiter les déperditions hivernales. Suis le grès, le schiste et enfin le Granite. La pierre calcaire est bien plus performante dans les deux zones et permettra plus facilement d'atteindre le confort hygrothermique pour une maison.

Néanmoins, ces simulations ne peuvent pas être caractérisées de complètement réalistes, car les données d'entrées ne sont pas suffisantes.

Dans un second temps, l'analyse entre les différentes orientations (expositions) de la paroi en pierre a permis de réaliser que cette dernière n'est que peu importante.

Les températures de surfaces extérieures diffèrent énormément, mais la température transmise à la température de surface intérieure est sensiblement égale. Ceci s'explique, car la majorité des transferts de chaleur s'effectuent par conduction. En hiver, la paroi au sud permet une température de surface intérieure légèrement supérieure si l'ensoleillement est conséquent et continu sur plusieurs jours. En été, la différence est légèrement plus importante, mais s'équilibre entre les parois orientées à l'Est, l'Ouest et au sud qui atteignent des températures de surfaces plus importantes qu'au Nord. La différence s'atténue avec la diminution du coefficient de déperdition thermique (U) de la paroi, donc plus cette dernière est épaisse plus la différence devient négligeable.

Dans un troisième temps, la comparaison entre différentes inclinaisons (fruits) de la paroi a permis, en complémentarité de l'analyse précédente, d'affirmer que ce dernier (le fruit) n'induit pas de changement significatif de la température de surface intérieure. Cela a permis de démontrer que l'angle d'impact du rayonnement solaire n'a pas un impact suffisant pour considérer ce choix comme

une solution passive. Une paroi plus inclinée (avec donc un fruit plus important) donnera une température de surface intérieure plus faible en hiver et plus élevée en été. Le seul avantage observé peut-être après une succession de jours d'ensoleillement en mi-saison. Le seul avantage du fruit du mur est la modification de son épaisseur qui elle a un fort impact.

Dans un quatrième temps, l'analyse de différentes pierres calcaires a permis de démontrer que bien que ces pierres soient du même types, elles présentent des propriétés (physiques, thermiques et hydriques) significativement différentes pour les transferts hygrothermiques. En effet, les conductivités thermiques des pierres étudiées diffèrent suffisamment afin d'observer des différences entre les pierres. Dans la zone Nord-Ouest, la pierre la plus efficace est la pierre de Saint-Vaast-Fine et dans la zone Sud-Est c'est la pierre de Vers-Pont-du-Gard.

Dans un cinquième temps, l'analyse de différentes épaisseurs de parois en pierre calcaire (les plus 'performantes' pour chaque zone) a permis de valider le fait que c'est un élément très impactant. En effet, l'épaisseur est l'élément impactant le plus la valeur U de la paroi, étant donné que la pierre possède généralement une conductivité thermique élevée (entre 0,5 et 1 W/m.K) pour une pierre calcaire tendre), l'épaisseur est le facteur le plus important. De plus, l'évolution de cette valeur de U étant une fonction inverse tend vers une valeur moins rapidement selon l'épaisseur qu'un matériau avec une faible conductivité thermique. A partir de 80cm une paroi en pierre permet d'atteindre la zone de confort hygrothermique définie dans chaque zone d'étude, en revanche, le confort d'été est impacté par un déphasage très important. Pour la gestion de l'humidité, à partir de 40 cm, une paroi en pierre permettra de correctement gérer les échanges d'humidité entre intérieur et extérieur.

Dans un sixième temps, l'analyse a porté sur différentes combinaisons de parois isolées par l'extérieur en béton de chanvre. L'isolation avec du béton de chanvre permet dans un premier un énorme gain de température en hiver car ce matériau bien plus isolant limite les déperditions en hiver. L'ajout d'une épaisseur de béton de chanvre permet de fortement réduire l'épaisseur de la façade, selon le contexte, 20cm de pierre équivaut de 5 à 10cm de béton de chanvre. Possédant une certaine inertie, le béton de chanvre complète les propriétés thermiques de la pierre. Placé à l'extérieur, 10cm de béton de chanvre permet d'isoler une paroi en pierre correctement si son épaisseur est supérieure ou égale à 40cm. De plus, toutes les parois simulées permettent une gestion suffisante de l'humidité. En effet, l'ajout de béton de chanvre permet de créer une paroi entièrement

perspirante tout en étant isolée, cette dernière régule les échanges d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur.

Dans un septième temps, l'analyse a porté, analogiquement à l'isolation par l'extérieur, sur l'isolation en béton de chanvre par l'intérieur. Au même titre que l'isolation par l'extérieur, l'isolation par l'intérieur permet une substitution d'une certaine épaisseur de pierre en béton de chanvre permet d'affiner la paroi tout en améliorant ses propriétés hygrothermiques. Avec 10cm de béton de chanvre et une épaisseur supérieure ou égale à 40cm de pierre, la paroi permet d'atteindre une température de surface intérieure dans la zone de confort. Les parois permettent toute une régulation de l'humidité correcte et dans la zone de confort définie.

Bien que l'isolation par l'extérieur apparaisse comme légèrement plus efficaces, ces simulations en 2D à l'échelle de la paroi permettent difficilement de comprendre la différence entre isolation par l'intérieur et isolation par l'extérieur. Dans les deux cas, la paroi épaisse devient alors stabilisatrice de la température et de l'humidité entre l'intérieur et l'extérieur. La zone de confort pour la gestion de l'humidité est plus facilement atteinte que celle pour la gestion de la température. Cette analyse ne permet pas de visualiser les échanges de chaleur et de restitution d'énergie stockée dans la masse du matériau à l'intérieur.

De plus, pour les deux simulations, une épaisseur de béton de chanvre supérieure à 15cm n'est pas nécessaire.

Dans un huitième temps, l'analyse du mur double a dans un premier temps été réalisée avec une lame d'air non ventilée. Cette analyse a permis de démontrer que la lame d'air permet une isolation thermique très efficace en hiver tout en conservant le déphasage thermique d'une paroi en pierre continue. En revanche, la faible épaisseur de pierre présente de part et d'autre de la lame d'air pose des questions de gestion de l'humidité qui n'a pas le temps de se stabiliser posant un fort taux d'humidité dans la paroi. Il est question de faire attention à la condensation pour une faible épaisseur de pierre entre la lame d'air et l'extérieur. De plus, le dimensionnement de la paroi d'un point de vue structurel doit sûrement être réalisé autrement. Du moins, cette combinaison présente des avantages très intéressants, l'épaisseur de la lame d'air devient alors l'élément principal dimensionnant le confort d'hiver, l'épaisseur de pierre guide le temps de déphasage permettant le confort d'été. Un complément pourrait être la ventilation de cette lame d'air en été permettant une évacuation vers l'extérieur de l'énergie stockée dans la pierre.

Dans un neuvième temps, l'analyse a porté sur le remplissage de la lame d'air précédente avec du béton de chanvre. La gestion de la température est légèrement moins efficace qu'avec une lame d'air, mais la gestion de l'humidité est parfaitement réalisée, bien que, comme précédemment, l'humidité dans la paroi peine à se stabiliser. Au même titre qu'une isolation par l'extérieur ou l'intérieur, le béton de chanvre permet de se substituer d'une épaisseur de pierre et de limiter les déperditions en hiver, mais augmente tout de même le déphasage thermique. Avec 10cm de béton de chanvre et au minimum 40cm de pierre, la paroi est suffisamment isolée pour l'hiver. En revanche, cette composition de paroi est moins intéressante qu'une isolation par l'intérieur ou par l'extérieur.

Enfin, il convient de conclure pour chaque zone d'étude ce qu'ont révélé ces simulations à l'échelle de la paroi quant aux besoins et aux moyens d'y répondre.

Dans la zone nord-Ouest, il est principalement question de limiter les déperditions en hiver et d'avoir une température de surface intérieure avoisinant les 19°C. La température estivale de la surface intérieure est presque toujours dans la zone de confort et ce même pour une paroi de 30cm d'épaisseur pour n'importe quel type de pierre. La température étant faible en hiver avec un faible apport solaire, il est principalement question de limiter les déperditions. Pour une paroi en pierre non isolée, même avec la pierre calcaire la plus performante thermiquement de celles analysées, il est nécessaire d'avoir une paroi d'une épaisseur supérieure ou égale à 80cm pour assurer une température de paroi intérieure supérieure ou égale à 18°C. L'isolation en béton de chanvre permet de significativement améliorer le confort hygrothermique de la paroi.

Dans la zone Sud-Est, il est autant question de limiter les apports de chaleur en été que les déperditions en hiver. Une paroi trop peu épaisse induira des températures de surface intérieures trop élevées en été et trop faibles en hiver. La pierre la plus performante dans la zone d'étude étant moins efficace thermiquement que celle extraite dans le nord de la France, et, la température de surface intérieure minimale étant adaptée à la condition climatique (avec une certaine exigence), il est aussi nécessaire d'avoir une épaisseur supérieure ou égale à 80cm de pierre pour atteindre les 19°C en surface intérieure en hiver. En revanche, une épaisseur de 50cm permet d'être au-dessus des 18°C. En été, une épaisseur inférieure ou égale à 40cm ne permet pas d'avoir une température de surface intérieure constamment en dessous des 24°C. Une isolation en béton de chanvre permet aussi de considérablement améliorer le confort hygrothermique à l'intérieur.

L'analyse à l'échelle de la paroi met en évidence l'influence déterminante de la conductivité thermique des matériaux et du coefficient de déperdition, directement lié à l'épaisseur et à la composition de la paroi. La prise en compte de l'humidité, et notamment de l'évolution de la conductivité thermique en condition saturée, apparaît également essentielle pour l'évaluation du confort hygrothermique, bien que difficilement intégrable dans les outils de simulation utilisés.

La paroi en pierre présente un comportement thermique fortement dépendant des saisons. Grâce à son inertie, elle est particulièrement performante pour le confort d'été et demeure efficace en mi-saison, notamment dans le sud de la France. En revanche, elle induit des déperditions importantes en hiver dans les deux zones climatiques étudiées, entraînant des températures de surface intérieure trop faibles.

Le déphasage thermique permis par une paroi en pierre non isolée, d'une épaisseur comprise entre 30 et 50 cm, constitue un atout majeur. Il permet de décaler les pics de chaleur extérieure et de favoriser une restitution thermique différée à l'intérieur, contribuant au confort lorsque les températures extérieures sont proches de la zone de confort. Ce phénomène dépend des propriétés thermiques de la roche et de l'épaisseur de la paroi.

Toutefois, ce fonctionnement devient limitant en période hivernale. Bien que l'ajout d'une isolation en béton de chanvre ou un épaissement de la paroi permette de réduire les déperditions, cette approche interroge la pertinence d'une optimisation uniquement matérielle de la paroi. Elle souligne la nécessité d'envisager d'autres leviers, notamment à l'échelle de la conception architecturale, pour répondre aux exigences réglementaires en matière de besoins de chauffage.

Enfin, l'inertie thermique de la pierre reste conditionnée à la présence d'apports de chaleur internes. Même en hiver, elle peut néanmoins favoriser une meilleure répartition de la chaleur dans le bâtiment, confirmant que les performances de la paroi en pierre doivent être analysées en lien étroit avec les stratégies bioclimatiques et la conception globale de l'habitat.

		Comparaison	Durée	Climat	Orientation	Inclinaison	Épaisseur	Pierre
1_TP	1_TPA	Types de Pierres	1 année	Rennes	Sud	90°	30cm	x
	1_TPH	Types de Pierres	96h hiver	Rennes	Sud	90°	30cm	x
	1_TPE	Types de Pierres	96h été	Rennes	Sud	90°	30cm	x
2_O	2_OA	Orientations paroi	1 année	Rennes	x	90°	50cm	Calcaire tendre
	2_OH	Orientations paroi	96h hiver	Rennes	x	90°	50cm	Calcaire tendre
	2_OE	Orientations paroi	96h été	Rennes	x	90°	50cm	Calcaire tendre
3_I	3_IA	Inclinaisons paroi	1 année	Rennes	Sud	x	50cm	Calcaire tendre
	3_IH	Inclinaisons paroi	96h hiver	Rennes	Sud	x	50cm	Calcaire tendre
	3_IE	Inclinaisons paroi	96h été	Rennes	Sud	x	50cm	Calcaire tendre
4_PC	4_PCA	Pierres Calcaires	1 année	Rennes	Sud	90°	50cm	x
	4_PCH	Pierres Calcaires	96h hiver	Rennes	Sud	90°	50cm	x
	4_PCE	Pierres Calcaires	96h été	Rennes	Sud	90°	50cm	x
5_E	5_EA	Épaisseur Calcaire	1 année	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	5_EH	Épaisseur Calcaire	96h hiver	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	5_EE	Épaisseur Calcaire	96h été	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
6_ITE	6_ITEA	Isolation par l'extérieur	1 année	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	6_ITEH	Isolation par l'extérieur	96h hiver	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	6_ITEE	Isolation par l'extérieur	96h été	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
7_ITI	7_ITIA	Isolation par l'intérieur	1 année	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	7_ITIH	Isolation par l'intérieur	96h hiver	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	7_ITIE	Isolation par l'intérieur	96h été	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
8_MDA	8_MDAA	Mur double (air)	1 année	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	8_MDAH	Mur double (air)	96h hiver	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	8_MDAE	Mur double (air)	96h été	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
9_MDB	9_MDBA	Mur double (béton de chanvre)	1 année	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	9_MDBH	Mur double (béton de chanvre)	96h hiver	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine
	9_MDBE	Mur double (béton de chanvre)	96h été	Rennes	Sud	90°	x	Saint Vaast Fine

Figure 220 : Tableau récapitulatif des simulations réalisées dans la zone Nord-Ouest et des paramètres utilisés (Source : Auteur)

		Comparaison	Durée	Climat	Orientation	Inclinaison	Épaisseur	Pierre
1_TP	1_TPA	Types de Pierres	1 année	Marseille	Sud	90°	30cm	x
	1_TPH	Types de Pierres	96h hiver	Marseille	Sud	90°	30cm	x
	1_TPE	Types de Pierres	96h été	Marseille	Sud	90°	30cm	x
2_O	2_OA	Orientations paroi	1 année	Marseille	x	90°	50cm	Calcaire tendre
	2_OH	Orientations paroi	96h hiver	Marseille	x	90°	50cm	Calcaire tendre
	2_OE	Orientations paroi	96h été	Marseille	x	90°	50cm	Calcaire tendre
3_I	3_IA	Inclinaisons paroi	1 année	Marseille	Sud	x	50cm	Calcaire tendre
	3_IH	Inclinaisons paroi	96h hiver	Marseille	Sud	x	50cm	Calcaire tendre
	3_IE	Inclinaisons paroi	96h été	Marseille	Sud	x	50cm	Calcaire tendre
4_PC	4_PCA	Pierres Calcaires	1 année	Marseille	Sud	90°	50cm	x
	4_PCH	Pierres Calcaires	96h hiver	Marseille	Sud	90°	50cm	x
	4_PCE	Pierres Calcaires	96h été	Marseille	Sud	90°	50cm	x
5_E	5_EA	Épaisseur Calcaire	1 année	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	5_EH	Épaisseur Calcaire	96h hiver	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	5_EE	Épaisseur Calcaire	96h été	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
6_ITE	6_ITEA	Isolation par l'extérieur	1 année	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	6_ITEH	Isolation par l'extérieur	96h hiver	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	6_ITEE	Isolation par l'extérieur	96h été	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
7_ITI	7_ITIA	Isolation par l'intérieur	1 année	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	7_ITIH	Isolation par l'intérieur	96h hiver	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	7_ITIE	Isolation par l'intérieur	96h été	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
8_MDA	8_MDAA	Mur double (air)	1 année	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	8_MDAH	Mur double (air)	96h hiver	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	8_MDAE	Mur double (air)	96h été	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
9_MDB	9_MDBA	Mur double (béton de chanvre)	1 année	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	9_MDBH	Mur double (béton de chanvre)	96h hiver	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard
	9_MDBE	Mur double (béton de chanvre)	96h été	Marseille	Sud	90°	x	Vers Pont du Gard

Figure 219 : Tableau récapitulatif des simulations réalisées dans la zone Sud-Est et des paramètres utilisés (Source : Auteur)

5.2_ Les échanges thermiques dans une maison en pierre naturelle

Pour faire suite à une première partie des expériences réalisées à l'échelle de la paroi, la seconde porte sur la maison entière. Au même titre que précédemment, l'analyse se divisera selon les deux zones d'étude.

Cette expérience présentée brièvement dans la méthode de recherche générale en fin d'introduction, a pour but d'analyser le fonctionnement thermique d'une maison en pierre.

La deuxième partie de ce dernier volet du mémoire se divise donc de la manière suivante.

Dans un premier temps une rapide analyse sol-air pour les deux zones permettra d'en apprendre plus sur le lien entre la forme et les transferts thermiques des parois opaques. Dans un second temps, une présentation du fonctionnement des simulations dans Grasshopper et des paramètres définis pour chaque zone aura pour but de faciliter la compréhension des expériences. Dans un troisième temps, les résultats seront présentés et analysés. Enfin, une conclusion permettra de résumer les principaux résultats et donnera une analyse globale des expérimentations réalisées.

5.2.1_ Première analyse à l'aide de l'approche sol-air

5.2.1.1_ Paramètres et mise en place de la simulation

L'analyse à partir de l'approche sol-air se fait entièrement à l'aide de Grasshopper et de quelques plugins. La Figure 225 présente l'entière du script Grasshopper utilisé pour les simulations. La première partie en orange représente l'ensemble des paramètres définis de façon paramétrique. La partie en bleue représente la transcription des données d'entrées pour en déterminer $T_{sol-air}$ et Q_c pour chaque scénario de paramètre entrant. Et la partie orange à droite représente la compilation de ces résultats dans un document excel ainsi que la sauvegarde d'images de chacun des scénarios simulés.

L'analyse sol-air se basant sur l'analyse de plusieurs ratios de volumes définis par des paramètres précis doit donc commencer par la définition et la modélisation de ces derniers. La Figure 224 montre la partie du script prenant en compte la définition de ces derniers. La maison est ici représentée par un volume de $100m^2$ et d'un niveau de 3m de haut. Les ratios analysés sont entrés sous forme de liste. L'ensemble des paramètres devant être pris en compte dans l'analyse multi-critère réalisée à l'aide de Colibri sont connecté au module spécifique.

La Figure 221 et la Figure 223 montrent plus en détail la partie du script permettant d'effectuer les calculs et connexions nécessaires à la définition des données finales analysables. Et ce, en fonction des paramètres définis précédemment et des données du climat à l'aide du fichier EPW des deux zones étudiées.

La Figure 222 montre l'ensemble des éléments finaux permettant l'export des données.

Ce script assure alors une rapidité d'analyse et ce pour n'importe quel climat avec les paramètres voulus.

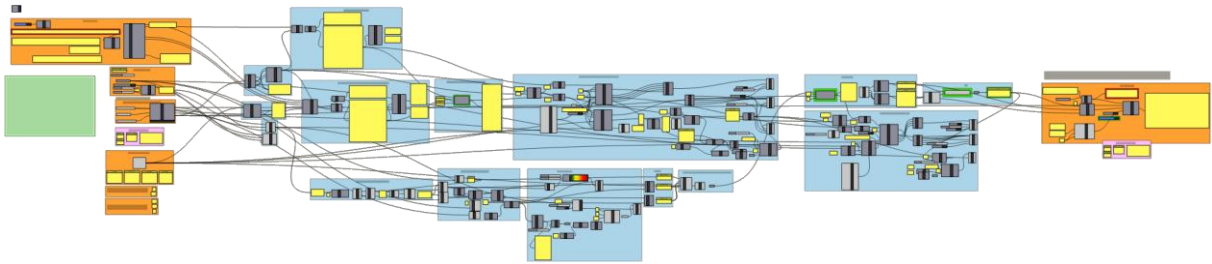


Figure 225 : Script Grasshopper complet utilisé pour les simulations sol-air (Source : Auteur)

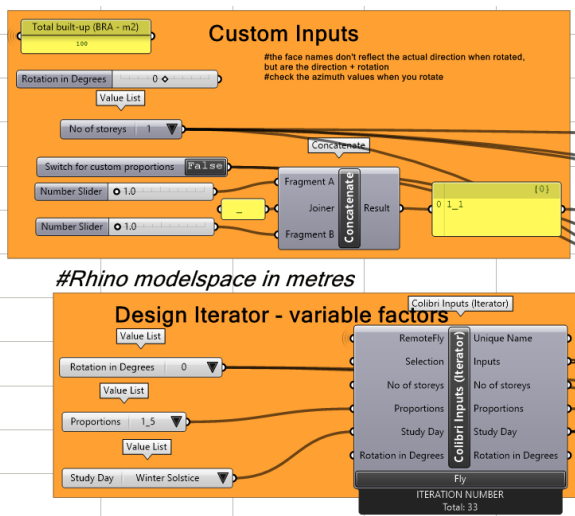


Figure 224 : Eléments paramétriques à implémenter comme variable de design pour l'optimisation multi-critère (Source : Auteur)

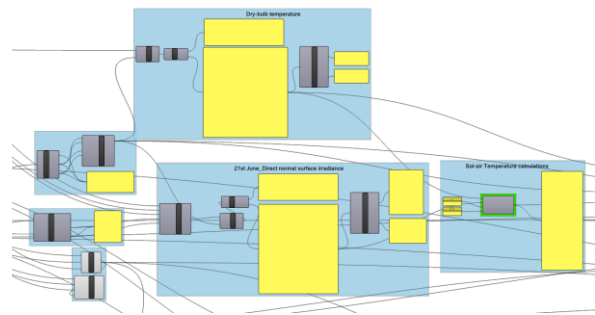


Figure 221 : Partie du script Grasshopper ayant pour but de calculer T_{sol-air} pour chaque période d'analyse selon le fichier EPW du climat dans lequel est réalisé l'étude (Source : Auteur)

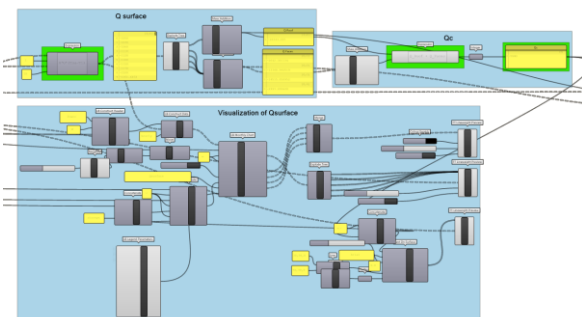


Figure 223 : Partie du script Grasshopper ayant pour but de calculer Q_c pour chaque face de la maison et de les combiner pour calculer Q_{total} (Source : Auteur)

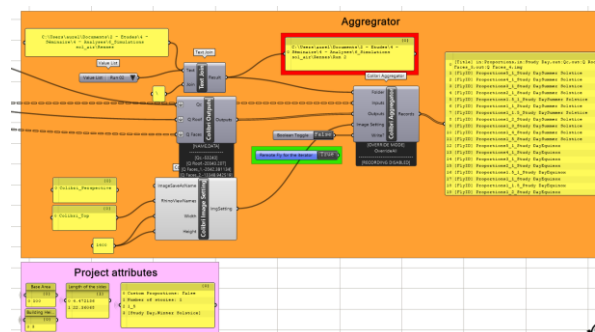


Figure 222 : Automatisation de la compilation des résultats, des paramètres et des visualisations à l'aide du plugin Colibri (Source : Auteur)

5.2.1.2_ Zone Nord-Ouest

Pour la zone Nord-Ouest, l'expérience est réalisée avec le document EPW de Rennes. Les résultats se lisent dans un premier temps à l'aide du cycle solaire, sur lequel est censé se baser la simulation sol-air.

La simulation sur le cycle solaire montre ici que dans un premier temps, le fait d'avoir deux niveaux engendre plus de déperditions au solstice d'été, légèrement plus de déperditions à l'équinoxe et autant de déperditions qu'un seul niveau en hiver pour les ratios proches de 1_1. Plus le ratio devient important, plus la différence entre un seul et deux niveaux devient importante.

Sur le cycle solaire et une forme à un seul niveau, la valeur la plus proche de 0 pour le solstice d'été est -124 W pour un ratio de 1_5, à l'équinoxe est -42 753 W pour le ratio 1_1 et au solstice d'hiver est -44 064 W pour un ratio de 1_1 aussi. Pour une forme à deux niveaux, les ratios sont les mêmes mais les valeurs sont différentes, -2 731 W pour le solstice d'été, -44 045 W à l'équinoxe et -43 718 W au solstice d'hiver.

Par la suite, une simulation sur le cycle de température est réalisée afin d'observer les résultats influencés par les températures extérieures, plus influentes sur les échanges de chaleur avec les bâtiments.

Sur le cycle de température, la différence entre avoir un seul et deux niveaux et la même que précédemment. Cependant, les valeurs moyennes sont différentes avec un Q total positif en été, négatif à l'équinoxe et en hiver mais plus éloignés.

Sur cette deuxième simulation sol-air pour une forme à un seul niveau, la valeur la plus proche de 0 au solstice d'été est de 9 929 W pour un ratio 5_1, à l'équinoxe est -33 225 W pour un ratio 1_1 et au solstice d'hiver est -51 712 W pour un ratio de 1_1. Pour une forme à deux niveaux, les ratios sont identiques pour chaque période mais avec des valeurs de Q différentes ; 6 172 W pour le solstice d'été, -34 497 W à l'équinoxe et -51 708 W au solstice d'hiver.

Le ratio 1_5 est le plus performant lorsque l'on réalise une simulation sur le cycle solaire au solstice d'été car les valeurs de Q sont négatives. Alors que pour une simulation identique sur le cycle de température, les valeurs de Q sont positives, le ratio avec la valeur la plus proche de 0 est ici 5_1.

Lors du solstice d'hiver, les ratios les plus performantes sont les ratios les plus compacts car le ratio entre la surface au sol et la surface de façade exposée est plus faible. Les ratios 1.5_1, 1_1 et 1_1.5 sont les plus efficaces au solstice d'hiver et à l'équinoxe sans réelle différence entre un et deux niveaux.

Les résultats sont peu tranchés et démontrent que pour cette simulation, il n'y a pas de ratio clair et plus performant que les autres pour une forme attribuée au ratio d'un volume simplifié. On considère que selon les résultats, la forme la plus 'performante' se rapproche d'un ratio compact mais légèrement vers les formes étendues orientées Nord-Sud, l'entre deux étant 2_1.

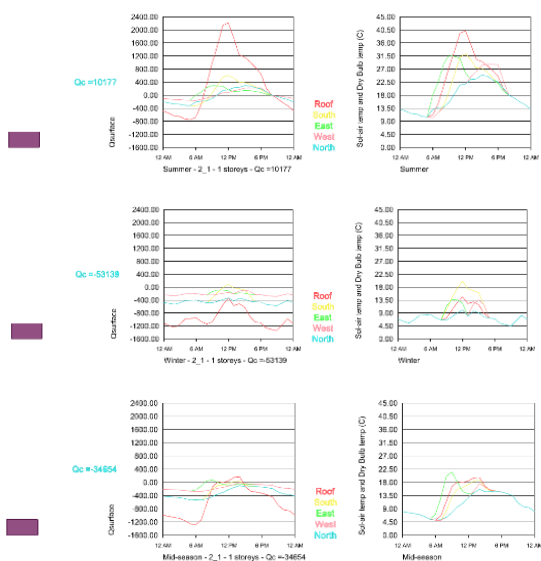


Figure 226 : Évolution de Q et de Tsol-air pour un ratio 2_1 pour le cycle de température (1 niveau)

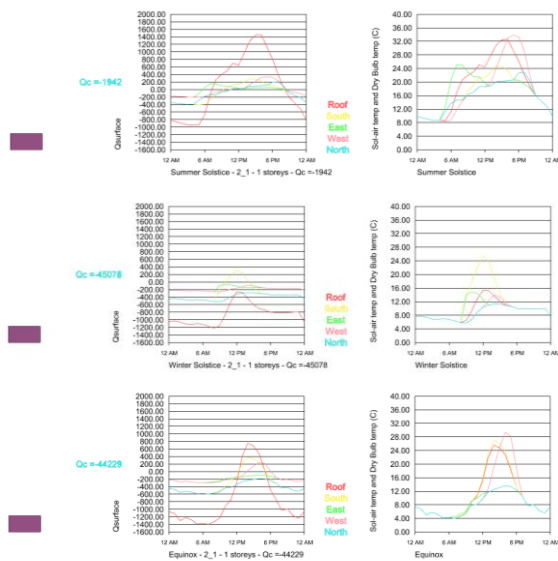


Figure 227 : Évolution de Q et de Tsol-air pour un ratio 2_1 pour le cycle solaire (1 niveau)

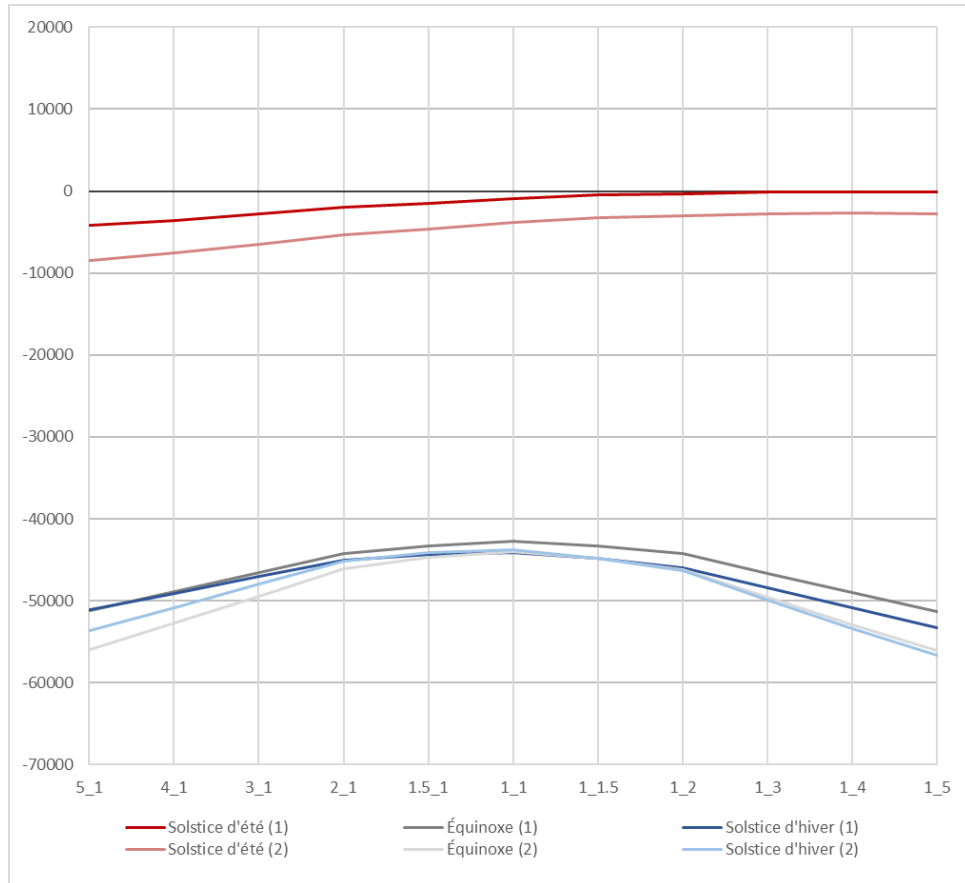


Figure 229 : Évolution de Q [W] d'une journée d'hiver, d'été et à l'équinoxe, selon le cycle solaire, pour différents ratios de maisons, à Rennes (Source : Auteur, réalisé à l'aide de Grasshopper)

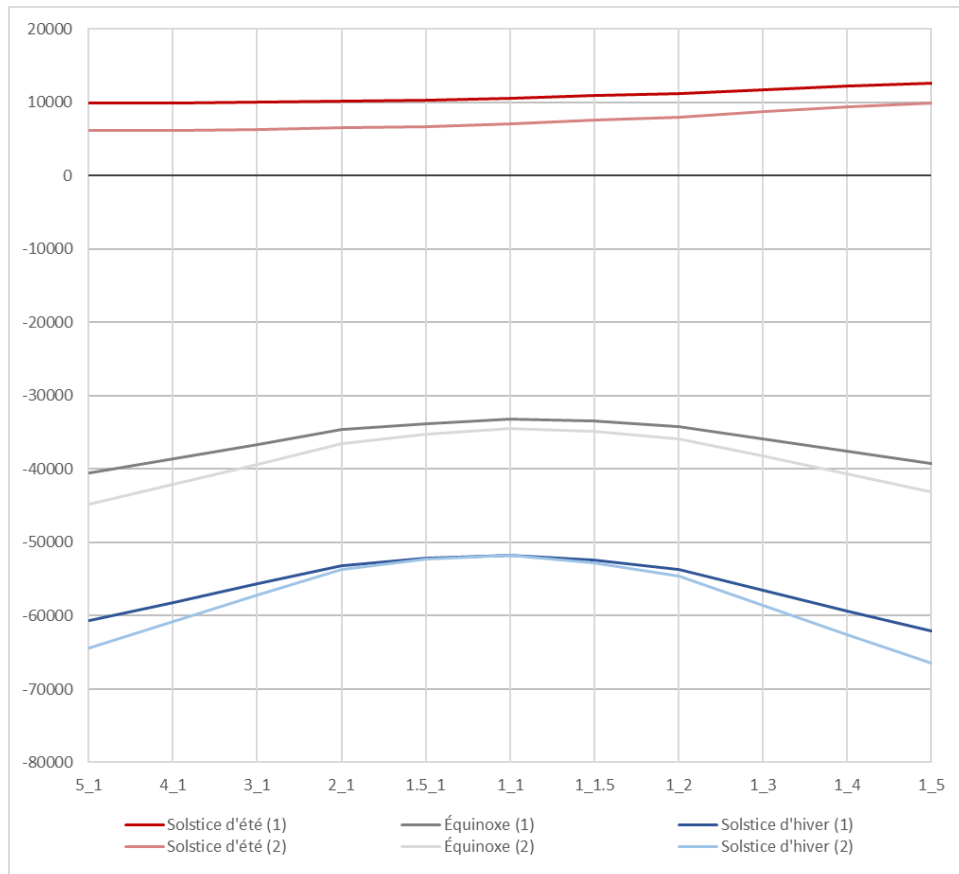


Figure 228 : Évolution de Q [W] d'une journée d'hiver, d'été et à l'équinoxe, selon le cycle de température, pour différents ratios de maisons, à Rennes (Source : Auteur, réalisé à l'aide de Grasshopper)

5.2.1.3_ Zone Sud-Est

Pour la zone Sud-Est, les simulations sont réalisées avec le document EPW de la ville de Marseille.

L'analyse dans un premier temps des résultats pour les simulations sur le cycle solaire montrent que les valeurs de Q sont réparties de part et d'autre de 0. Les valeurs sur le solstice d'été sont très élevées montrant une grande quantité d'apports de chaleur et les valeurs à l'équinoxe et au solstice d'hiver sont négatives.

La différence entre un et deux niveaux est plus importante au solstice d'été ou avoir deux niveaux réduits les apports montrés par un Q inférieur à un volume à un niveau. La différence est presque inexistante à l'équinoxe et au solstice d'hiver.

Sur le cycle solaire pour une simulation d'un volume à un niveau, au solstice d'été la valeur de Q la plus faible est 56 771 W pour un ratio de 1.5_1, à l'équinoxe la valeur la plus élevée est - 8 413 W pour un ratio de 1_1 et au solstice d'hiver la valeur la plus élevée est - 25 141 W pour un ratio de 1.5_1. Lorsque le volume comporte deux niveaux, les tendances et les ratios sont les mêmes avec des valeurs de Q différentes. Au solstice d'été, la valeur la plus faible est 49 268 W, à l'équinoxe la valeur la plus élevée est - 11 804 W et - 25 162 W au solstice d'hiver.

Au solstice d'été il est plus intéressant d'avoir deux niveaux, il en est de même à l'équinoxe. Les miniums et maximums orientent vers une forme légèrement plus étendue et on le remarque bien sur le graphique ci-contre.

Le ratio le plus optimal selon cette simulation est 1.5_1.

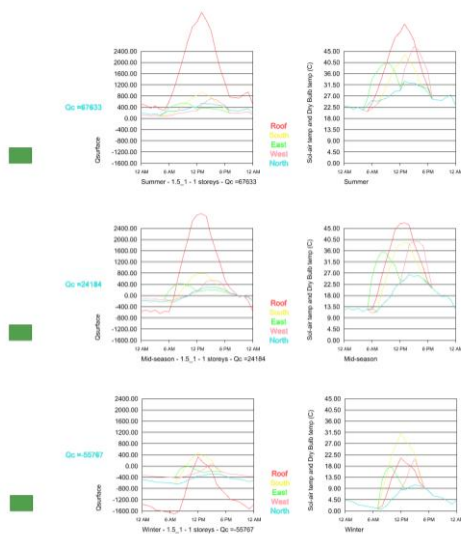


Figure 230 : Évolution de Q et de Tsol-air pour un ratio 1.5_1 pour le cycle de température (1 niveau)

Sur le cycle de température, les courbes sont les mêmes que pour le cycle solaire mais les valeurs ont plus élevé en été et plus faibles en hiver.

Sur cette simulation, pour un volume à un niveau, la valeur de Q la plus basse au solstice d'été est égale à 67 449 W pour un ratio de 1_1, à l'équinoxe à 24 426 W pour un ratio de 1.5_1 et au solstice d'hiver la valeur la plus élevée de Q est de - 55 463 W pour un ratio de 1_1. Encore une fois, pour les valeurs d'un volume à deux niveaux, les ratios optimaux sont les mêmes pour les deux solstices et à l'équinoxe. Au solstice d'été la valeur la plus faible est 61 461 W et 18 788 W à l'équinoxe et la valeur la plus élevée au solstice d'hiver est - 55 988 W.

Sur ce cycle, les résultats montrent un ratio optimal plus proche du ratio 1_1 même si la différence avec les autres ratios est faible. Le ratio optimal se rapproche fortement du 1_1 avec un léger décalage vers les ratios en forme de rectangle orientés Nord-Sud (2_1, 1.5_1).

En combinant les deux études, le ratio optimal semble être le ratio 1.5_1.

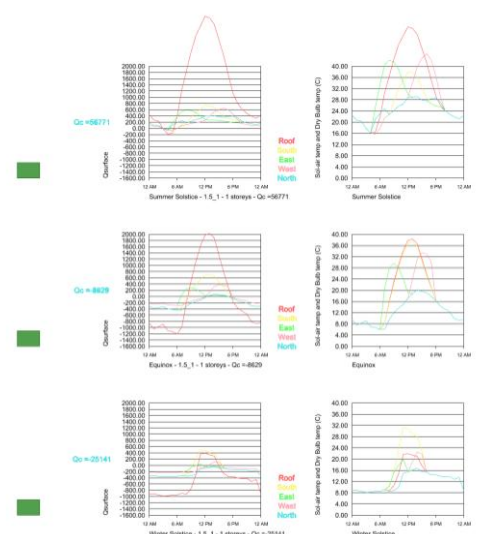


Figure 231 : Évolution de Q et de Tsol-air pour un ratio 1.5_1 pour le cycle solaire (1 niveau)

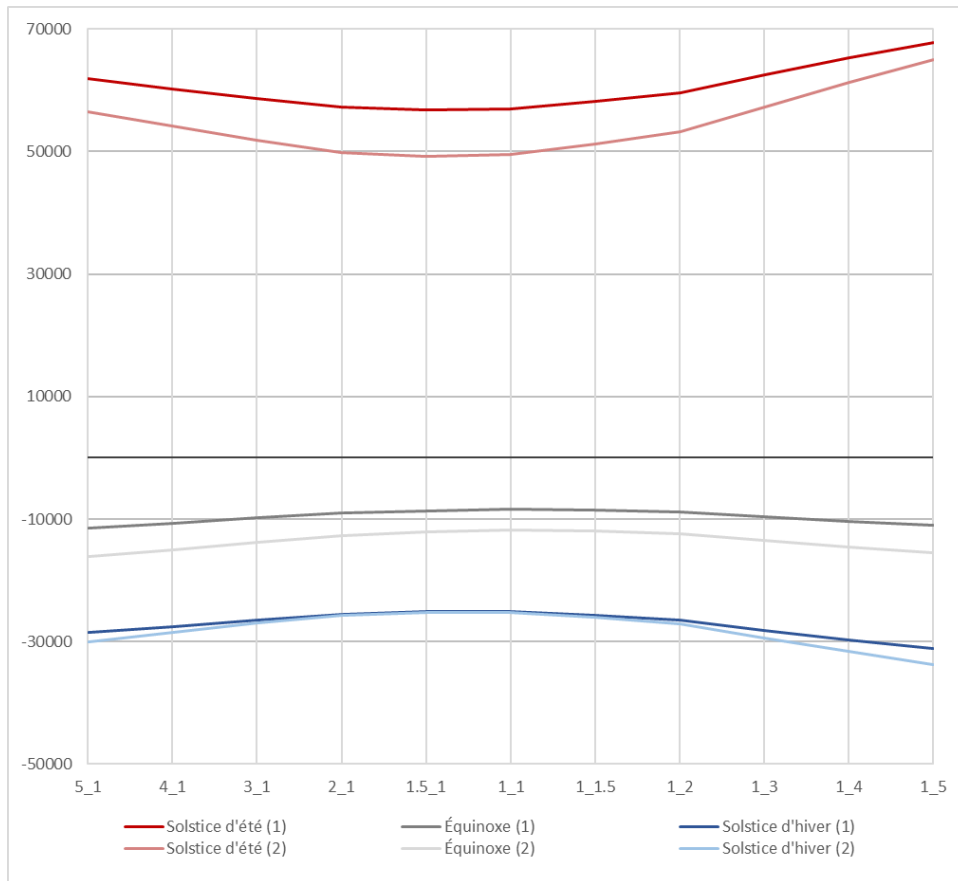


Figure 233 : Évolution de Q [W] d'une journée d'hiver, d'été et à l'équinoxe, selon le cycle solaire, pour différents ratios de maisons, à Marseille (Source : Auteur, réalisé à l'aide de Grasshopper)

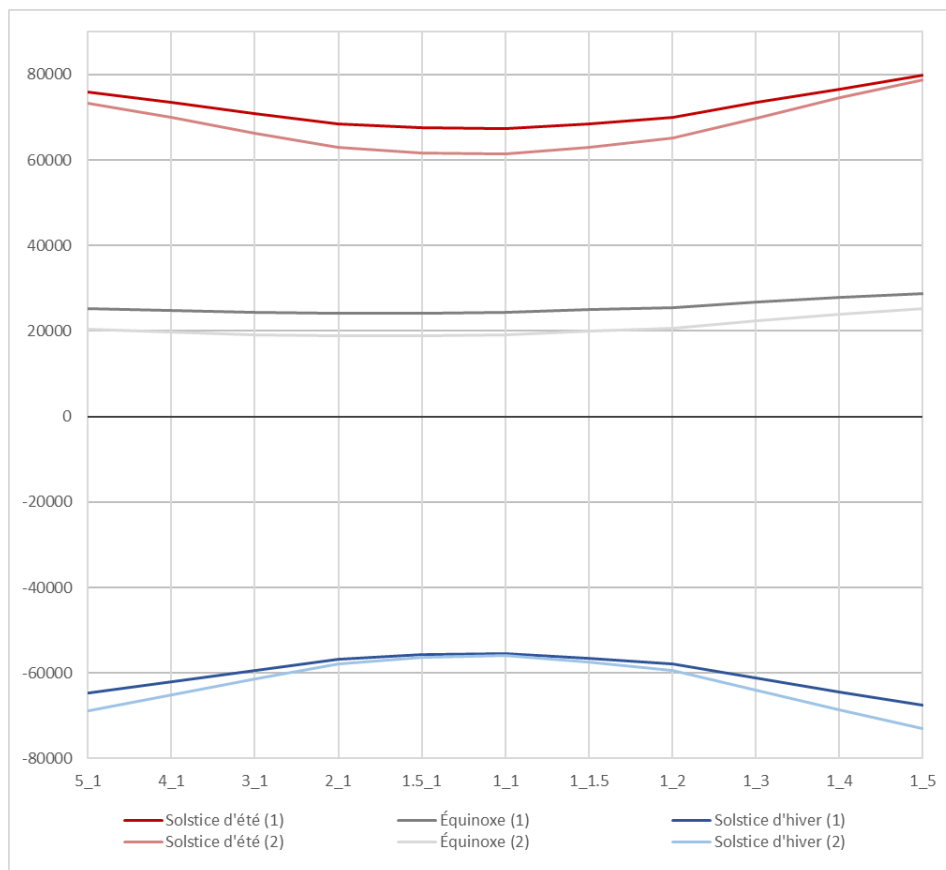


Figure 232 : Évolution de Q [W] d'une journée d'hiver, d'été et à l'équinoxe, selon le cycle de température, pour différents ratios de maisons, à Marseille (Source : Auteur, réalisé à l'aide de Grasshopper)

5.2.2_ Définitions des paramètres de simulations des deux zones

5.2.2.1_ Paramètres généraux communs aux deux zones

- Toiture et plafonds en structure bois isolés

Pour faciliter la mise en place des expériences, les matériaux employés pour les toitures et plafonds resteront inchangés. Ils sont définis par le set de construction climat cool et construction bois (5 – Cool ; Wood-Frame). La valeur de U pour la toiture est de $0,12 \text{ W/m}^2\text{°C}$. La valeur de U pour le plancher entre la maison et les combles est de $0,18 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

- Vitrage en double vitrage avec Argon et menuiserie bois

Pour les vitres j'ai choisi de prendre du double vitrage rempli au gaz pour ses performances de résistance thermique intéressantes et parce que le facteur d'irradiation solaire reste important (mal dit mais à redire). La Valeur Ug du vitrage est de $1,32 \text{ W/m}^2\text{°C}$ et la transmission solaire est de 80%. La menuiserie des ouvertures est en bois.

- Programme habitant (midrise + 4 habs)

L'ensemble des simulations réalisées utilise un programme type d'habitation prédéfini dans grasshopper auquel j'ai ajusté le nombre de personnes vivant dans la maison à 4. Les résultats seront donc décrits à l'aide de trois valeurs en $\text{kWh/m}^2/\text{an}$, une pour le chauffage, une pour le refroidissement et une totale comprenant les deux précédentes plus la consommation estimée selon le programme de l'éclairage et de l'eau chaude dans le logement. C'est cette valeur qui est à comparer avec les objectifs donnés par la RE2020 et présentés précédemment. Les valeurs pour le refroidissement et le chauffage permettront de comprendre le lien entre chaque élément du projet et son impact sur la consommation pour ces deux éléments.

- Valeurs de mon modèle honeybee dans grasshopper (ventilation, ouverture fenêtres, mesure des éléments, etc)
- Surface habitable de 100m^2 (sauf vernaculaire)
- Hauteur d'un étage est de 3m

Ces valeurs stables permettent d'assurer une comparaison simplifiée entre les éléments observables et ne seront pas modifiés.

5.2.2.2_ Paramètres spécifiques Zone Nord-Ouest

Paramètres stables :

- Climat extérieure : EPW Rennes

Comme pour les analyses précédentes, les données climatiques utilisées sont celles données par le document EPW de la ville de Rennes (sur climateonebuilding.org)

- Température chauffage : 19°C
- Température refroidissement : 24°C

Définies précédemment suite à l'analyse climatique de la zone, elles correspondent au climat local.

- Orientation Nord-Sud

Au vu des besoins en chauffage important, de la course du soleil et de l'analyse portée sur cette zone, l'orientation de la maison restera pleinement Nord-Sud pour l'entièreté des expérimentations réalisées dans cette zone.

5.2.2.3_ Paramètres spécifiques Zone Sud-Est

Paramètres stables :

- Climat extérieure : EPW Marseille

Comme pour les analyses précédentes, les données climatiques utilisées sont celles données par le document EPW de la ville de Marseille (sur climateonebuilding.org)

- Température chauffage : 20°C
- Température refroidissement : 25°C

Définies précédemment suite à l'analyse climatique de la zone, elles correspondent au climat local.

- Orientation par rapport au Sud

Pour cette zone, l'orientation sera déterminée à l'aide d'une des simulations. Avant cela, l'orientation sera au Sud.

Il est important de rappeler que ces paramètres ont été définis ainsi pour axer les analyses sur d'autres paramètres. La définition de ces paramètres stables à un impact sur les performances énergétiques finales de la maison. Il est toujours possible de les adapter pour chercher une optimisation plus précise et adaptée aux besoins présentés par un cas précis.

5.2.2.4_ Mise en place du script Grasshopper pour les simulations

L'analyse de la suite de cette partie est réalisée à l'aide de Simulations Thermiques Dynamiques dans Grasshopper. Le script a alors été conçu pour cette recherche.

La Figure 237 montre le script dans son entièreté, de la modélisation paramétrique de la maison théorique à la visualisation graphique des résultats.

La Figure 238 montre l'ensemble des matériaux de construction opaques définis pour cette étude ainsi que la combinaison de ces derniers formant différentes parois. Une liste rassemble l'ensemble des possibilités, permettant un changement facilité entre les différentes combinaisons. Bien que qu'il n'ait pas été utilisé ici, un script d'optimisation paramétrique aurait pu utiliser cette liste afin d'en définir la meilleure combinaison de paroi possible avec des limites correctement définies.

La Figure 234 montre la définition des températures limites préalablement présentées. Et présente aussi les températures à entrer pour paramétrer la ventilation naturelle, ici pour la zone Nord-Ouest. Pour la zone Sud-Est, les valeurs sont toutes supérieures d'1°C.

La Figure 236 montre les éléments utilisés pour la définition d'un matériau de construction opaque. Les éléments pris en compte sont l'épaisseur, la conductivité thermique, la capacité thermique massique et la densité. Les autres faisant référence à l'absorption des rayonnements solaires incidents et des longues ondes, tous identiques pour cette étude. Cependant, aucune donnée en lien avec les propriétés hydriques du matériau n'est prise en compte. Il est donc important de savoir que l'humidité n'est pas du tout prise en compte et les résultats devront donc être complétés par ceux de l'analyse précédente.

La Figure 235 montre un exemple de création de pièce HoneyBee à partir d'un modèle réalisé dans Grasshopper ou dans Rhino. C'est ici que l'on attribue les matériaux de construction utilisés pour chaque face ainsi que le programme de la pièce. L'élément 'plenum' a été utilisé pour les pièces à considérer dans le calcul des échanges thermiques sans leurs attribuer de programme ni les prendre en compte dans la surface au sol chauffée.

La Figure 240 montre le script réalisé pour modéliser de manière paramétrique la maison des premières STD. Ce script permet de réutiliser plus facilement les ratios et de les transcrire en modèle Honeybee (Figure 241). Ceci permet de facilement réaliser les simulations pour les différentes formes et de revenir sur celle qui est la plus performante

pour la suite des simulations thermiques dynamiques.

La Figure 239 présente plus précisément la définition de la liste selon les différents ratios, induisant le choix des bonnes dimensions des côtés de la maison. La surface au sol habitable (sans comble) étant toujours de 100m².

La Figure 242 présente la définition paramétrique du ratio d'ouverture présent sur la façade de la maison paramétrique selon l'orientation de la façade. Ainsi, les choix peuvent être adaptés aux besoins et réalisés très rapidement.

Plusieurs éléments sont présentés de l'Annexe 96 à l'Annexe 101.

La définition de ce script Grasshopper a permis une étude efficace et ciblée des éléments influant les transferts thermiques d'une maison en pierre.

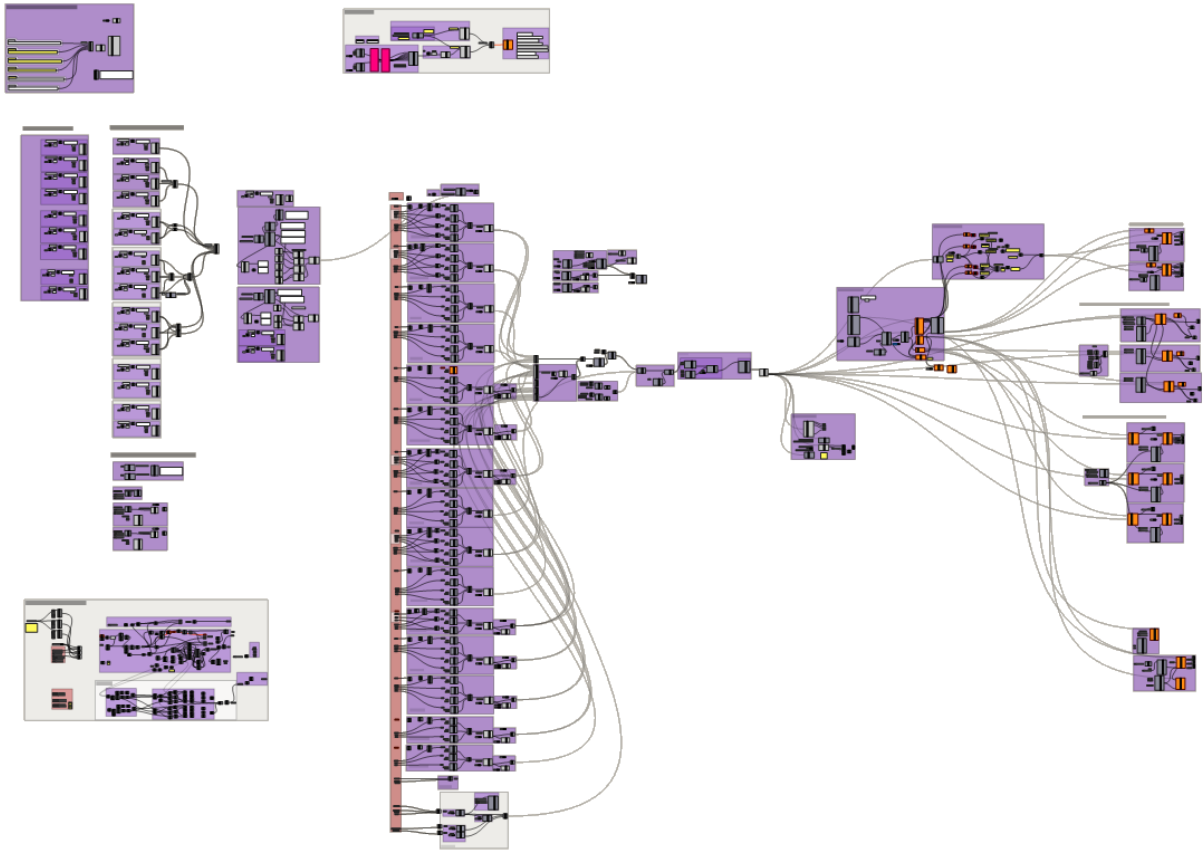


Figure 237 : Script Grasshopper complet pour la Simulation Thermique Dynamique de la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

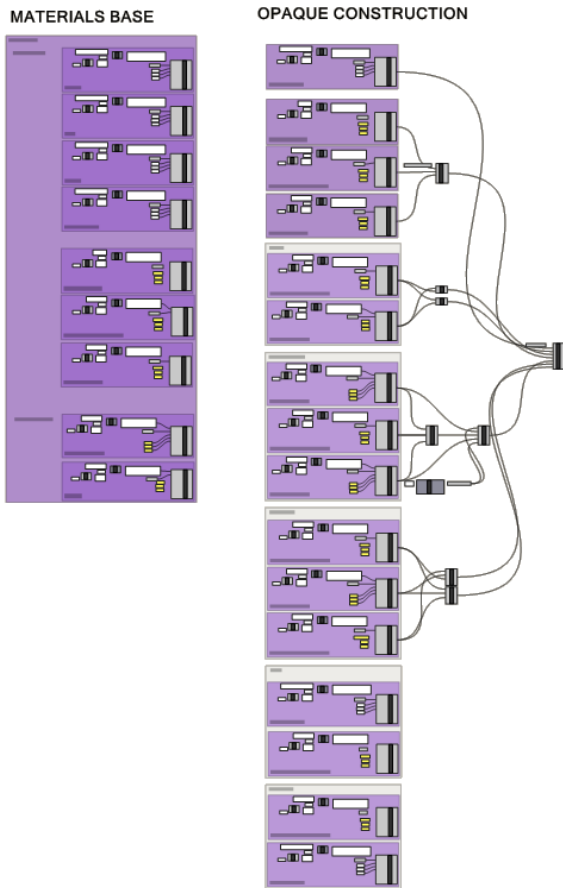


Figure 238 : Partie du script permettant de créer les différentes combinaisons de parois étudiées à partir de différents matériaux définis (Source : Auteur)

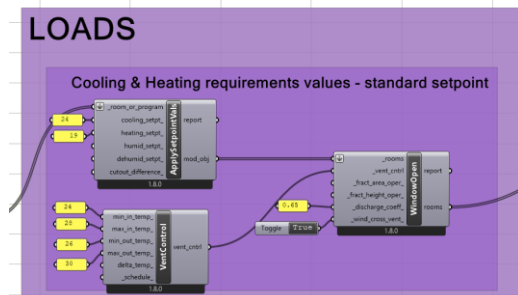


Figure 234 : Définition des températures limites pour le refroidissement, le chauffage et la ventilation naturelle (Source : Auteur)

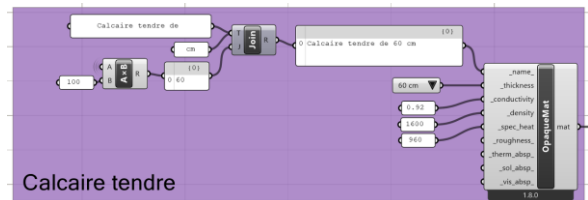


Figure 236 : Création d'un matériau de construction opaque à partir des données sur le matériau (Source : Auteur)

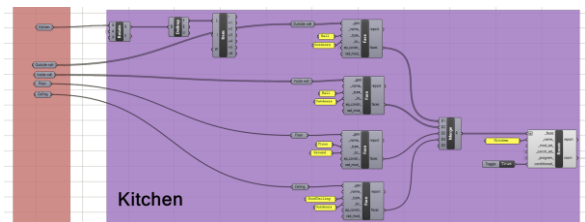


Figure 235 : Exemple de mise en place d'une pièce HoneyBee à partir d'une géométrie (Rhino ou Grasshopper) avec les paramètres de chaque faces (Source : Auteur)

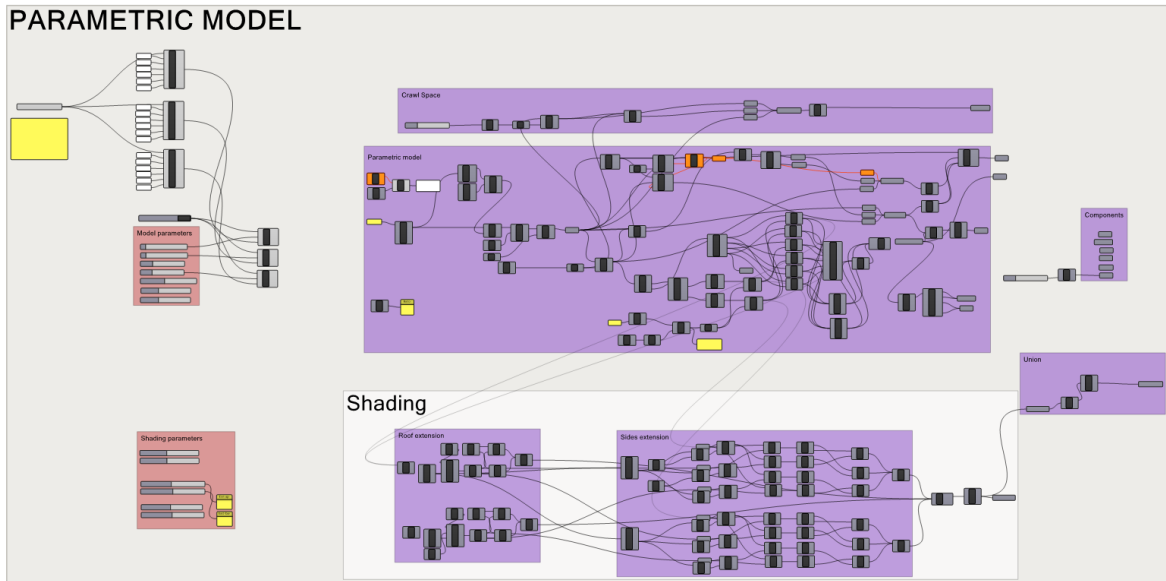


Figure 240 : Script de modélisation paramétrique de la maison simplifiée pour les STD (Source : Auteur)

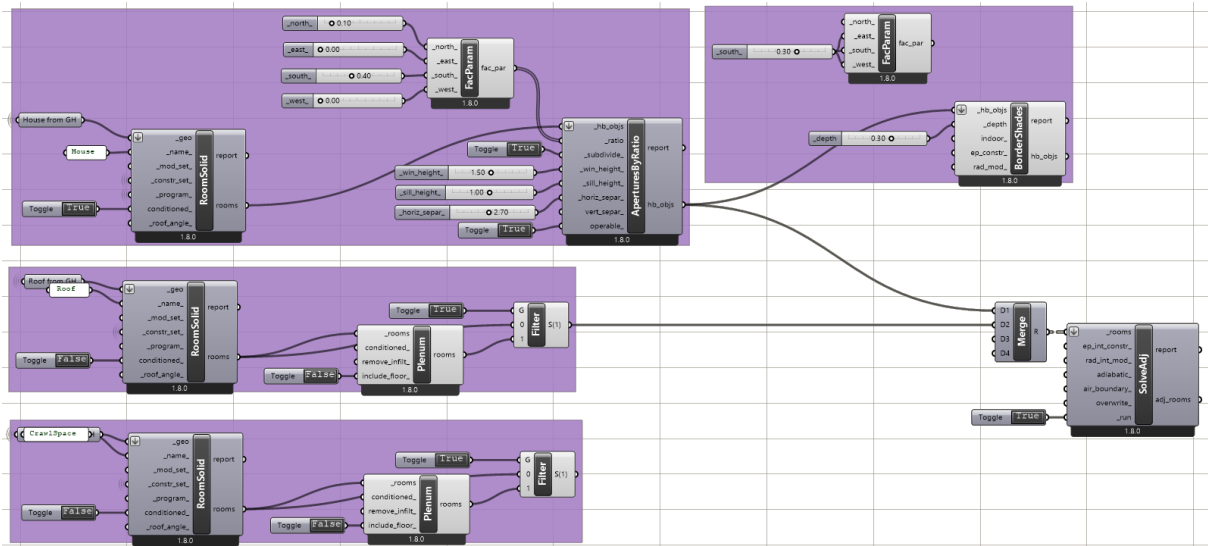


Figure 241 : Définition rapide du modèle Honeybee pour la maison simplifiée (Source : Auteur)

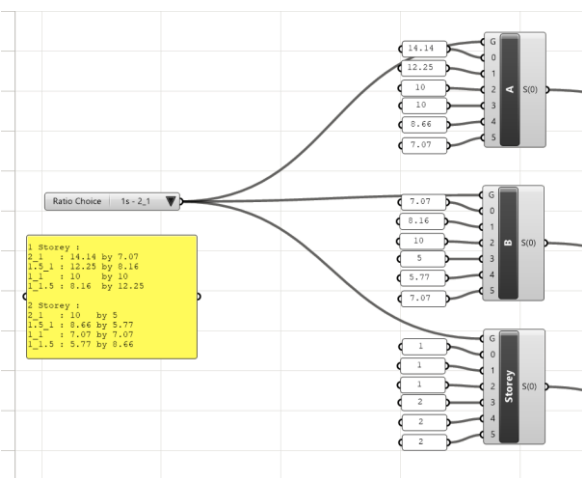


Figure 239 : Définition paramétrique des dimensions de la maison selon le ratio choisi pour la maison simplifiée (Source : Auteur)

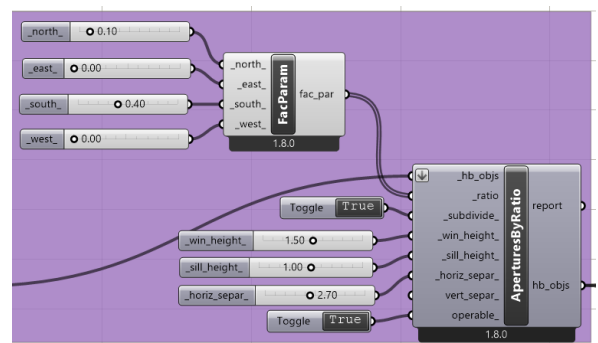


Figure 242 : Définition paramétrique des ratios d'ouvertures selon l'orientation de la façade pour la maison simplifiée (Source : Auteur)

5.2.3_ Maison de l'architecture vernaculaire

Cette première simulation a pour but d'analyser le bilan thermique d'une modélisation de maison de l'architecture vernaculaire présentée dans la partie 4.2, et ce, pour les deux zones d'étude.

5.2.3.1_Zone Nord-Ouest

La première simulation a pour but d'étudier l'équilibre des charges thermique d'une maison inspirée de l'architecture vernaculaire du Nord-Ouest de la France sans adaptation spécifique. Les valeurs de températures minimales de chauffage et de refroidissement sont les mêmes que pour les besoins modernes (définis précédemment, dans la partie 5.2.2.2)

La maison a été modélisée (Figure 243) sur la base de l'architecture vernaculaire présenté dans la partie 4.2.1.1 (Figure 88, Figure 90, Figure 89).

Les pièces à chaque extrémité sont considérées comme chauffées et prises en compte dans la surface totale chauffée. Néanmoins, elles peuvent être considérés comme des espaces tampons si elles ne sont que peu utilisées pendant la journée, atténuant les échanges avec l'extérieur. Autrefois, les animaux y étaient stockés, constituant un apport non négligeable de chaleur. Le toit est lui considéré comme un espace non chauffé et non utilisé, comme des combles servant uniquement au stockage, il n'est pas compté dans la surface au sol chauffé.

Les résultats de la simulation (Figure 245) montrent une consommation élevée pour le chauffage et quasi-inexistante pour le refroidissement. Le besoin estimé en chauffage s'élève à 115 kWh/m².an et celui en refroidissement s'élève à 3 kWh/m².an (ces chiffres sont présentés dans la Figure 312 résumant l'ensemble des résultats des simulations et présenté en conclusion de cette partie d'analyse). Le total des besoins estimé s'élève donc à 118 kWh/m².an, pour une maison de 72m².

Ce résultat correspond aux besoins présentés précédemment pour le Nord de la France. Le besoin en chauffage mensuel présenté permet de comprendre qu'il est important en hiver et presque nul durant l'été, où un faible besoin apparait durant la nuit. Le pic rouge représente l'apport énergétique solaire en milieu de journée. Pour chaque mois, est représenté les variations moyennes d'échanges de chaleur sur une journée.

La faible présence de stockage indique que le bâtiment ne stocke que peu d'énergie dans sa masse construite. Ce stockage augmente en été où l'apport solaire est plus important.

Le stockage fait ici référence à l'inertie, étant la capacité d'un matériau à stocker un trop plein d'énergie et de la restituer plus tard. Le stockage en partie inférieure indique que le bâtiment absorbe l'énergie intérieure (en trop) donnée principalement par les apports solaires des ouvertures. Le stockage en partie supérieure indique que le bâtiment restitue l'énergie à l'intérieur.

Un faible besoin de refroidissement apparait en été durant la journée lorsque que la température de l'air et l'apport solaire deviennent trop important, lorsque combinés.

Les pertes principales se font par les parois opaques et les infiltrations d'air montrant que les murs en pierres ici laissent partir toute la chaleur interne dû aux faibles températures extérieures. Les apports de chaleur se font principalement par le mode de chauffage utilisé, les apports solaires et internes ne sont pas assez importants face aux déperditions thermiques.

La température des pièces est donc en moyenne très proche de 20°C (Figure 244), sauf pour les pièces en extrémités comptant plus de façades déperditives. Les surfaces intérieures sont au-dessus de 19°C pour la façade sud mais aux alentours des 17°C pour la façade Nord et pour les façades des pièces en extrémité. Ceci démontre donc l'inconfort souvent relaté dans le bâti ancien dû au phénomène de paroi froide.

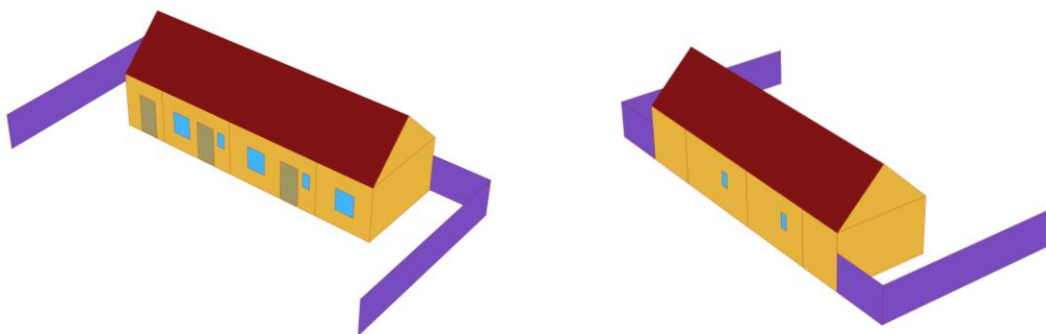


Figure 243 : Visualisation du modèle 3D de la STD de la maison vernaculaire de la zone Nord-Ouest (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

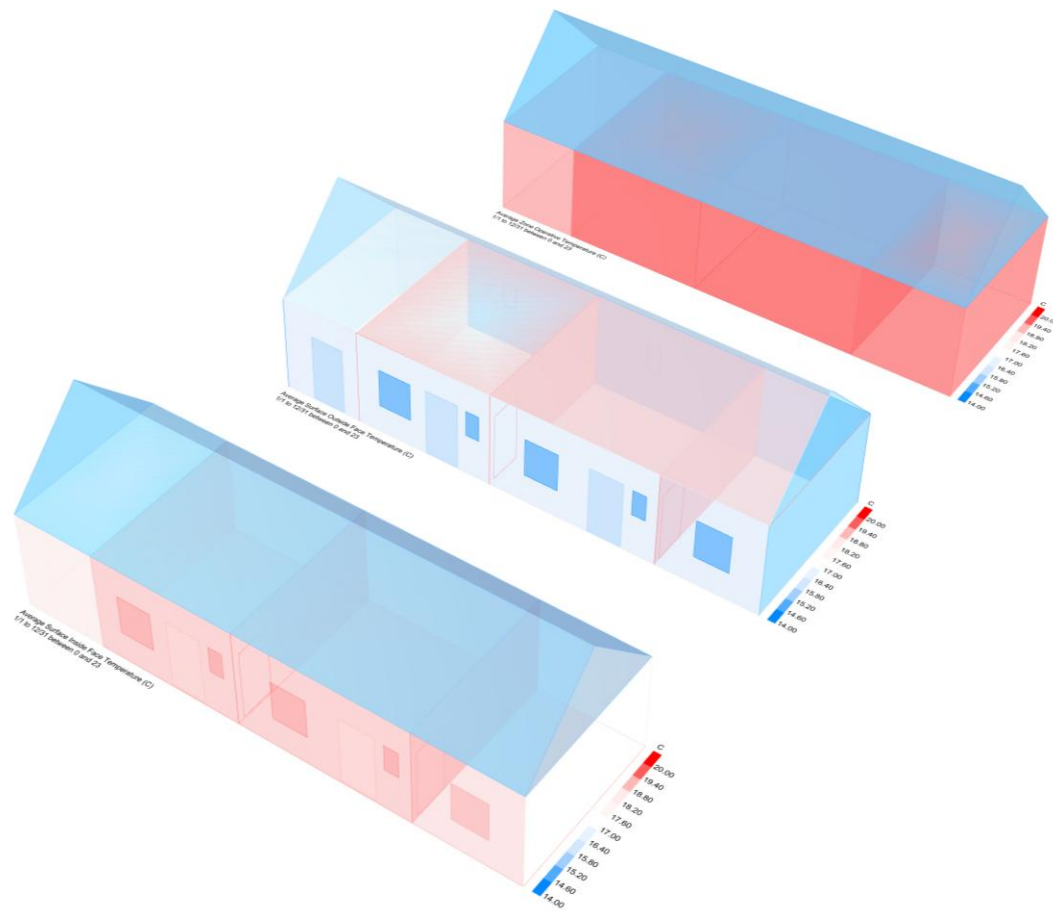


Figure 244 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

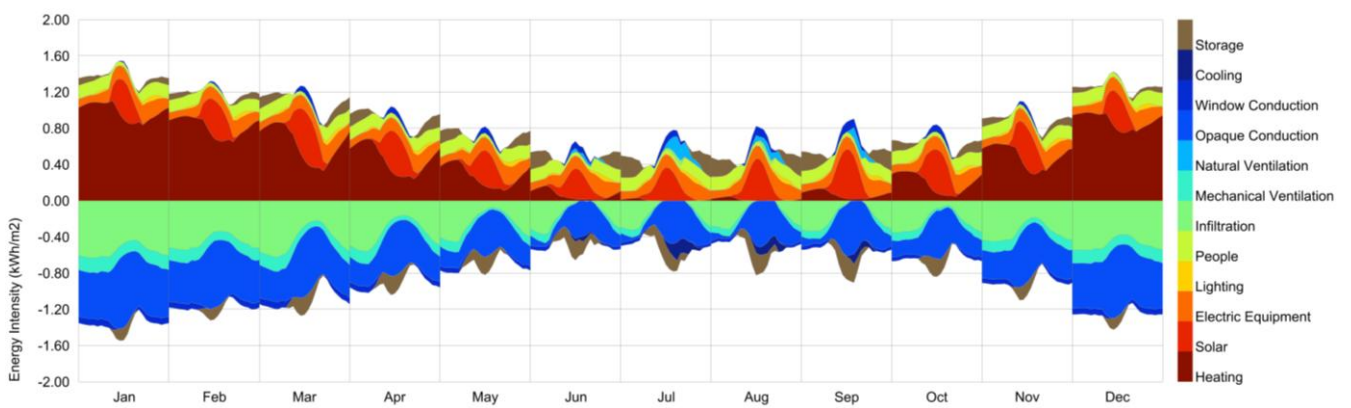


Figure 245 : Équilibre des charges thermiques de la maison vernaculaire dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

5.2.3.2_ Zone Sud-Est

Cette simulation a pour but d'étudier l'équilibre des charges thermique d'une maison inspirée cette fois-ci de l'architecture vernaculaire du Sud-Est de la France sans adaptation spécifique. Les valeurs de températures minimales de chauffage et de refroidissement sont les mêmes que pour les besoins modernes mais différents que pour la zone Nord-Ouest (cf. partie 5.2.2.2)

La maison a été modélisée sur la base de l'architecture vernaculaire présenté dans la partie 4.2.1.2 (Figure 96), le modèle 3D est présenté par la Figure 246.

Cette maison sur deux niveaux présente aussi deux petites extensions non chauffées. Le toit est lui aussi non chauffé et non pris en compte dans la surface au sol chauffée mais pris en compte dans les calculs.

Les résultats de la simulation (Figure 247) montrent un besoin élevé pour le chauffage mais moins important que pour l'architecture vernaculaire de la zone Nord-Ouest. En revanche, le besoin de refroidissement est important. La simulation montre donc un besoin estimé en chauffage de 76 kWh/m².an et celui en refroidissement est de 34 kWh/m².an pour un total de 110 kWh/m².an.

On observe sur le graphique de l'équilibre des charges thermiques un pic d'apport solaire durant la journée autant en été qu'en hiver. Le besoin en chauffage est présent principalement en hiver mais aussi en mars, avril, mai et octobre. Durant tout l'été il n'y a pas de déperditions thermiques par les parois opaques en dehors de la journée ou il fait plus chaud à l'intérieur. Cette surchauffe est causée par une grosse quantité de rayonnement solaire et une température extérieure élevée (Figure 92 et Figure 93). C'est donc en été qu'apparaît la ventilation naturelle. Cette dernière n'étant pas suffisante, le besoin en refroidissement devient très important et ce uniquement de Juin à Septembre. Le stockage représentant l'inertie n'est pas si présent, contrairement à ce que l'on pourrait penser.

La température moyenne des pièces au RDC est d'environ 21°C en moyenne à l'année, tandis que pour les pièces à l'étage, la température est plus élevée (Figure 248). La température la plus importante fait référence à un pièce de très petite surface comportant la même fenêtre que ses pièces voisines. L'important apport solaire crée une surchauffe de l'air intérieur. De plus, la surface extérieure des parois des pièces à l'étage est bien plus importante que les parois du RDC. Cela s'explique par la présence des arbres, présentant un masque au rayonnements solaires.

On réalise par ailleurs que les espaces de stockages et les combles, n'étant pas chauffés, présentent des températures de surface intérieures et de l'air en moyenne à l'année bien inférieures aux autres pièces. De plus, la température de surface extérieur de la façade au nord est bien plus faible (environ 16°C) que les autres façades (environ 19°C), et ce, même pour les pièces chauffées.

Enfin, l'équilibre des charges thermiques démontre que les déperditions de chaleur en hiver se font principalement par infiltration et par conduction des parois opaques. En été, il n'y a pas de déperdition par les parois opaques, uniquement par infiltration la nuit. Les apports solaires induisent alors une surchauffe de l'air intérieur créant un besoin très conséquent de refroidissement. Ceci est en partie dû à la valeur limite placée à 25°C. Le besoin en refroidissement est partiellement réalisé à l'aide de la ventilation naturelle, utilisable jusqu'à une certaine température de l'air extérieur. Le besoin en refroidissement est alors important. Les apports solaires permettent tout de même de se substituer de chauffage de début mais jusqu'à fin septembre. Alors que la valeur limite est placée à 20°C minimum.

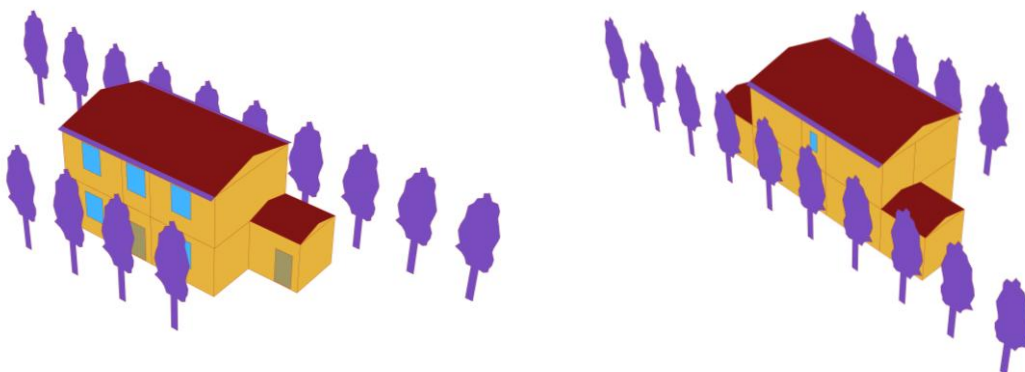


Figure 246 : Visualisation du modèle 3D de la STD de la maison vernaculaire de la zone Sud-Est (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

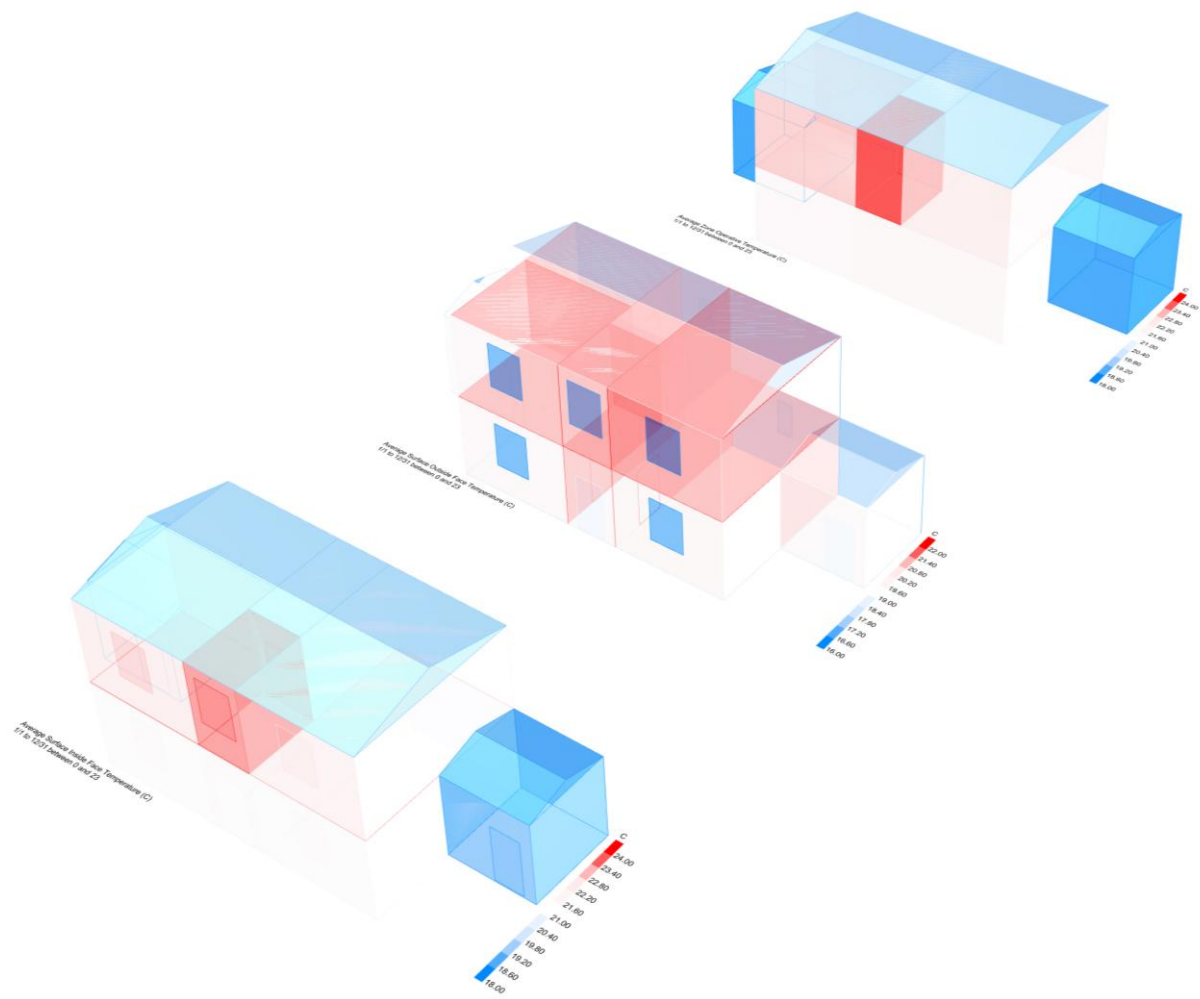


Figure 248 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

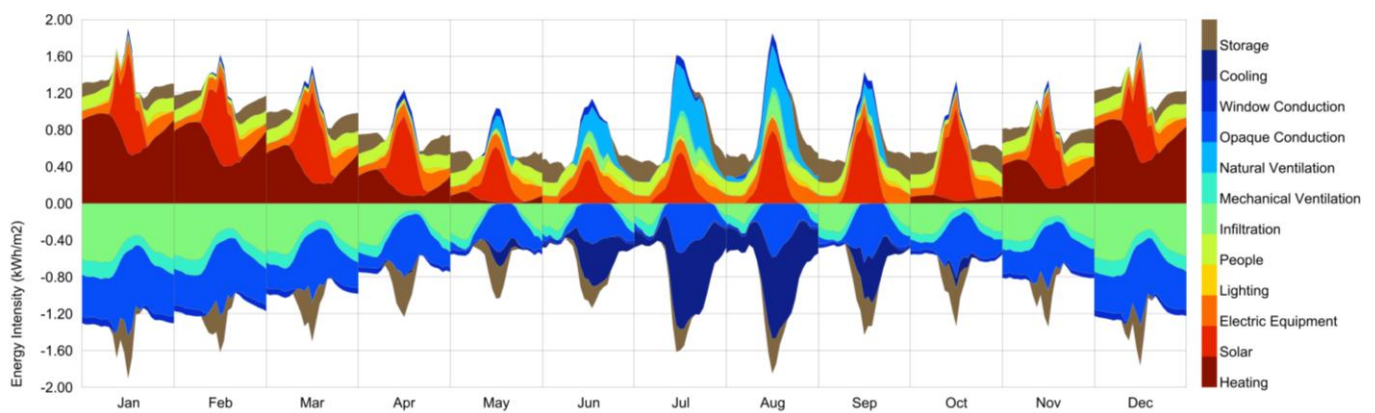


Figure 247 : Équilibre des charges thermiques de la maison vernaculaire dans la zone Sud-Est (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))

5.2.4_ Forme : possibilités de sol-air

Cette simulation a pour but d'approfondir l'analyse sol-air réalisée en partie 5.2.1 sur la taille de la maison, définie par son ratio. L'analyse avait permis de démontrer que les ratios compactes permettaient un meilleur compromis entre confort d'été et confort d'hiver. L'objectif est ici de comparer la différence entre les ratios compacts sur les besoins en chauffage et en refroidissement.

5.2.4.1_ Zone Nord-Ouest

L'analyse à l'aide de l'approche sol-air avait permis de démontrer que le ratio optimal pour la zone Nord-Ouest était le ratio 2_1 (façades Sud et Nord 2 fois plus longues que les façades Ouest et Est).

Pour cette zone, les trois ratios les plus performants de la partie 5.2.1 sont étudiés (2_1, 1.5_1, 1_1), tous, avec 1 et 2 niveaux (Figure 249). Ces maisons sont toutes simulées avec des ouvertures et des compositions de paroi propres aux maisons en pierre de la zone Nord-Ouest afin d'apporter plus de précision. De plus, un toit incliné à 45° est ajouté mais non comptabilisé dans la surface chauffée. Ici, l'ajout d'un niveau n'ajoute pas de surface habitable, elle est répartie sur les deux niveaux.

Les résultats (Figure 250) montrent que les simulations de maisons à deux niveaux ont un besoin en chauffage et en refroidissement plus importants que les maisons à un seul niveau. La différence montre bien à défaut des simulations précédentes qu'avoir un seul niveau permet de limiter les déperditions thermiques. Pour les différents ratios de maison à un seul niveau, les besoins totaux sont très proches. Le ratio 1.5 présente un besoin total de 71 kWh/m².an contre 72 kWh/m².an pour les ratios 2_1 et 1_1. Au vu de la faible différence, le ratio 2_1 sera conservé pour la suite des simulations, dans la continuité de l'analyse sol-air et en accord avec l'architecture vernaculaire de cette zone.

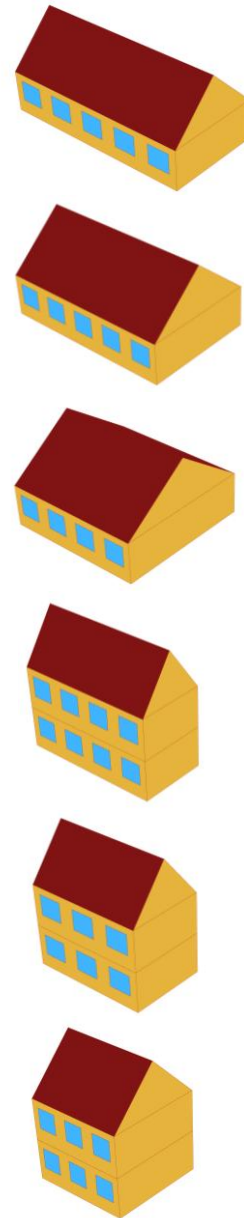


Figure 249 : Maisons simulées selon les différents ratios de l'approche sol-air avec 1 et 2 niveaux (Source : Auteur)

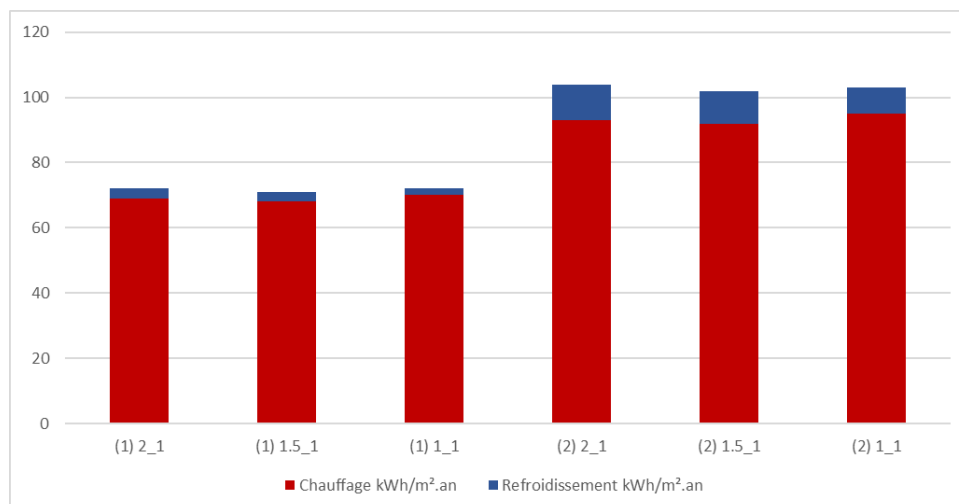


Figure 250 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différents ratios dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

5.2.4.2_ Zone Sud-Est

L'analyse à l'aide de l'approche sol-air pour la zone Sud-Est avait permis de démontrer que le ratio optimal était le ratio 1.5_1 (façades Sud et Nord 1,5 fois plus longues que les façades Ouest et Est).

Pour cette zone, les trois ratios les plus performants de la partie 5.2.1 sont étudiés (2_1, 1.5_1, 1_1, 1_1.5), tous, avec 1 et 2 niveaux (Figure 251). Ces maisons sont toutes simulées avec des ouvertures et des compositions de paroi propres aux maisons en pierre de la zone Sud-Est afin d'apporter plus de précision. De plus, un toit incliné à 15° est ajouté mais non comptabilisé dans la surface chauffée. Ici, l'ajout d'un niveau n'ajoute pas de surface habitable, elle est répartie sur les deux niveaux.

Les maisons à deux niveaux présentent ici aussi un besoin énergétique plus élevé (Figure 252). Le besoin en chauffage augmente légèrement, mais le besoin en refroidissement est bien supérieur pour les maisons à deux niveaux que pour celles à un seul niveau, environ 2 à 3 fois. Pour ce qui est des maisons à un seul niveau, les besoins sont plus ou moins équivalents entre les ratios 2_1, 1.5_1 et 1_1, le ratio 1_1.5 étant le moins performant. Le ratio 2_1 et 1.5_1 ont un besoin total estimé similaire, s'élevant à 63 kWh/m².an. Le ratio 1_5 sera retenue dans la continuité de l'analyse sol-air et en accord avec l'architecture vernaculaire.

Pour ce ratio, les besoins estimés en chauffage de 47 kWh/m².an et pour le refroidissement de 16 kWh/m².an, pour un total à 63 kWh/m².an. Le besoin en chauffage est plus de deux fois moins conséquent que dans la zone Nord-Ouest, tandis que les besoins en refroidissement sont 5 fois supérieurs. Les températures limites de chauffage et de refroidissement étant adaptées et différents pour chacune des deux zones.

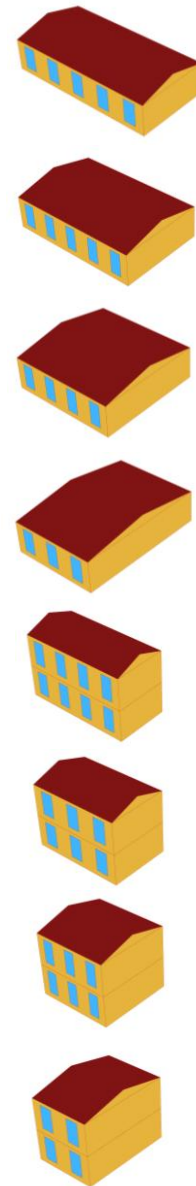


Figure 251 : Maisons simulées selon les différents ratios de l'approche sol-air avec 1 et 2 niveaux (Source : Auteur)

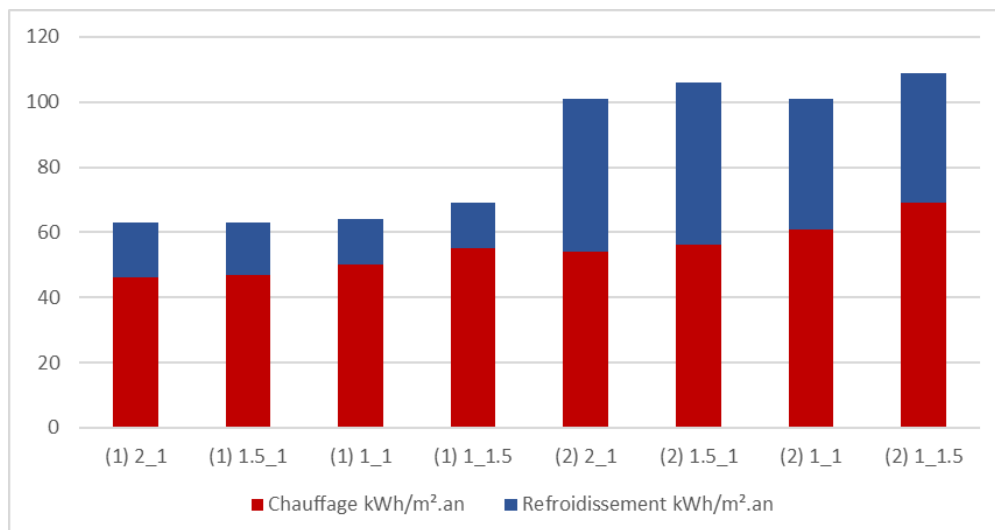


Figure 252 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différents ratios dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

5.2.4.3_ Orientation, Zone Sud-Est

La présentation de l'architecture vernaculaire de la zone Sud-Est (partie 4.2.1.2), indiquait une orientation de la maison légèrement vers l'est dans le but de protéger le bâtiment en exposant la façade Nord uniquement au vent du Nord-Ouest, le mistral (Figure 95). En effet, la rose des vents de la ville de Marseille (Figure 94) présentée, montrait un fort vent (rapide) venant du Nord-Ouest.

Il convient donc réaliser des simulations avec plusieurs orientation de la maison afin de comparer les besoins en chauffage et refroidissements. La simulation a été réalisée pour 4 orientations différentes en degré par rapport au sud : -12° , 0° , 12° et 25° (Figure 255).

Contrairement aux attentes, l'orientation n'impacte que très peu les besoins en chauffage et refroidissement (Figure 256). Une orientation au sud et à 12° par rapport au sud induit un besoin plus faible, mais peu conséquent. Ceci est sûrement dû à la simplicité de la maison modélisée, n'impliquant pas de dispositif nécessitant une ventilation naturelle ou une protection au vent particulière.

Pour rester en accord avec l'architecture vernaculaire et les principes bioclimatiques, un angle de 12° par rapport au sud vers l'est sera gardé. Les besoins restent inchangés suite à la simulation précédente.

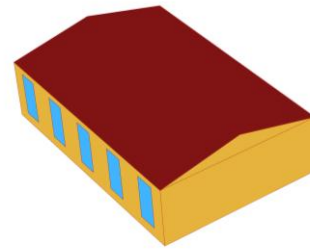


Figure 253 : Maison 1.5_1 orientée à -12° par rapport au Sud (Source : Auteur)

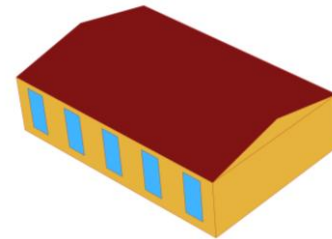


Figure 254 : Maison 1.5_1 orientée au Sud (Source : Auteur)

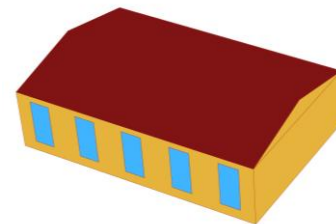


Figure 255 : Maison 1.5_1 orientée à $+12^\circ$ par rapport au Sud (Source : Auteur)

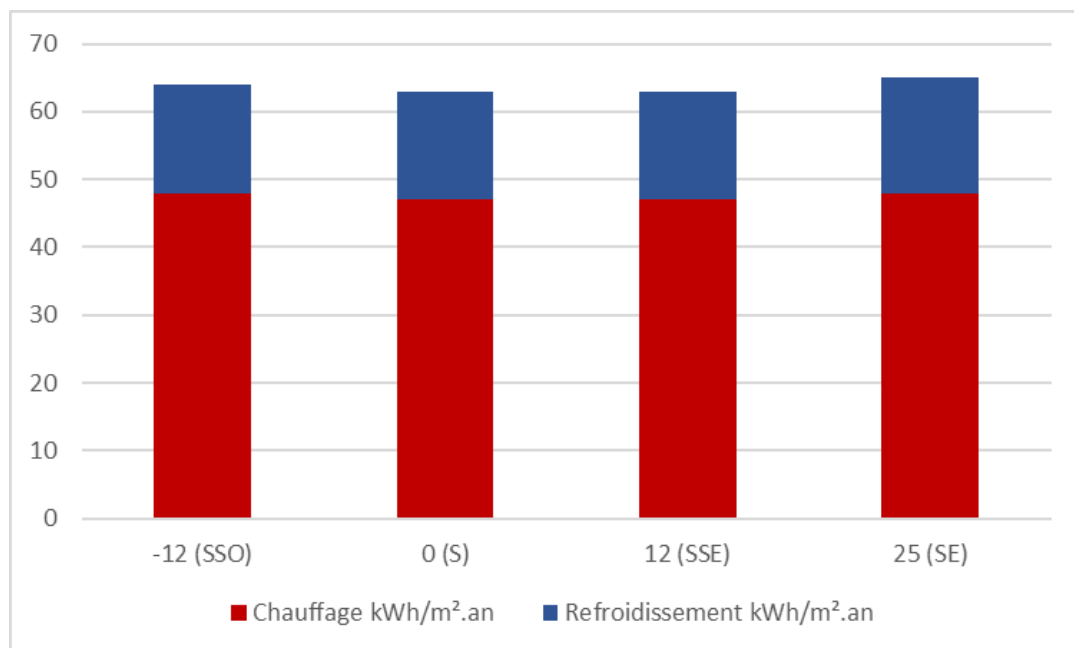


Figure 256 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différentes orientations simulées dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

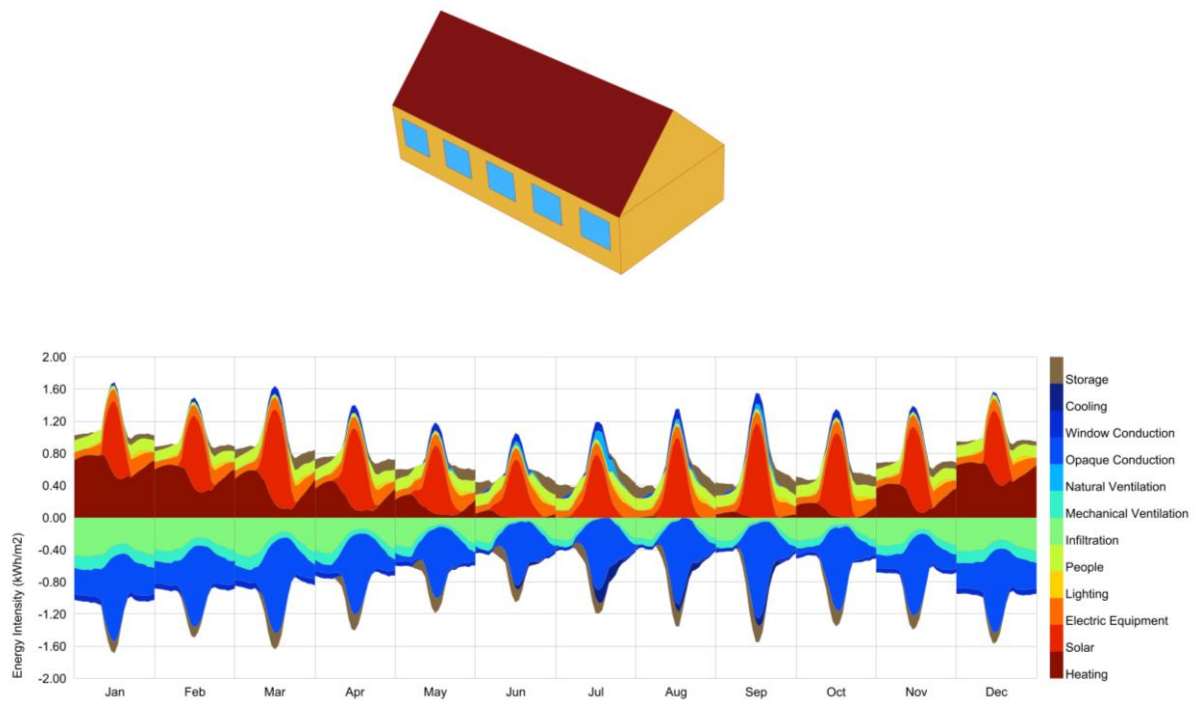


Figure 257 : Modèle 3D et équilibre des charges thermiques pour la maison après choix du ratio 2_1 dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

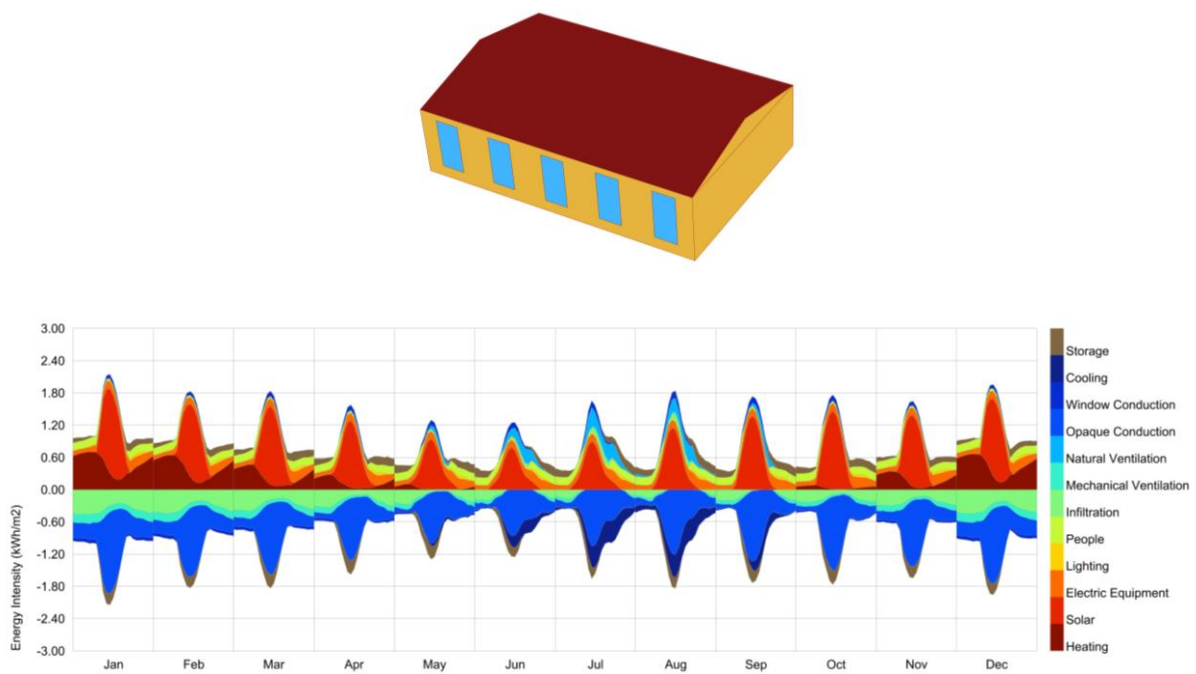


Figure 258 : Modèle 3D et équilibre des charges thermiques pour la maison après choix du ratio 1.5_1 et de l'orientation à 12° par rapport au Sud dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

5.2.5_ Ratio d'ouverture selon l'orientation de la façade

Le modèle paramétrique permet ici de tester différents ratios d'ouvertures à titre indicatifs permettant de visualiser l'impact des ouvertures sur les besoins en chauffage et en refroidissement.

5.2.5.1_ Zone Nord-Ouest

Dans la zone Nord-Ouest, les résultats montrent (Figure 261) que le ratio d'ouverture de la façade sud (Figure 259) est le plus important car l'apport solaire pour l'espace intérieur en est proportionnel. Néanmoins, une ouverture trop importante de la façade sud engendre une surchauffe et la naissance d'un besoin en refroidissement croissant. Il convient donc de trouver un équilibre ainsi que d'autres solutions.

La taille des ouvertures aux nord n'apporte que très peu de gains solaires, uniquement par de la lumière diffuse. Les gains sont donc faibles. Par contre, une faible ouverture permet une ventilation naturelle transversale et donc une diminution du besoin en refroidissement.

Les ouvertures à l'Ouest et à l'Est diminuent peu les besoins en chauffage et en refroidissement. Couplé aux besoins de protection de la surchauffe en été et aux réalisations vernaculaires, ces façades ne devraient pas être ouvertes. De plus, des ajouts ultérieurs sur ces façades permettront d'améliorer l'efficacité énergétique de la maison.

Pour la suite des simulations, sera conservé, un ratio d'ouverture de 0,4 pour la façade Sud, de 0,1 pour la façade Nord (Figure 260) et aucune ouverture pour les façades Est et Ouest. Le besoin estimé en chauffage est maintenant de 62 kWh/m².an et de 5 kWh/m².an pour le refroidissement, pour un total de 67 kWh/m².an.

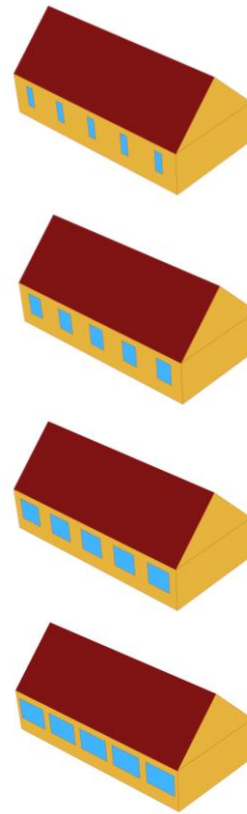


Figure 259 : Différents ratios d'ouverture au sud simulés (Source : Auteur)

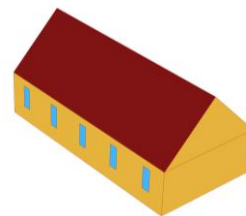


Figure 260 : Ratio d'ouverture conservé pour la maison au Nord (Source : Auteur)

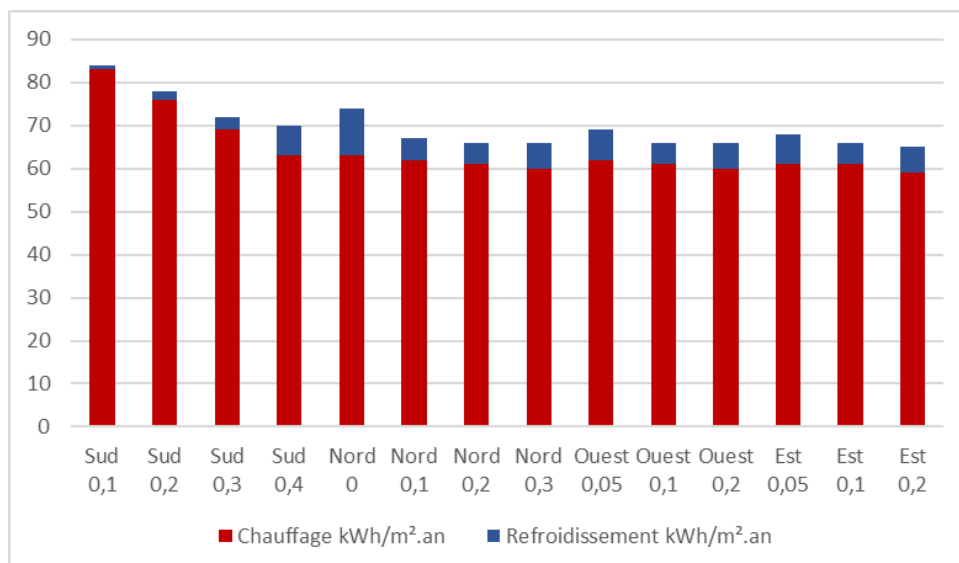


Figure 261 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différents ratios d'ouverture simulés pour chaque orientation dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

5.2.5.2_ Zone Sud-Est

Dans la zone Sud-Est, les résultats montrent (Figure 263) que le ratio d'ouverture de la façade sud (Figure 262) est aussi le plus important car il permet de fortement diminuer les besoins en chauffage, il augmente aussi fortement les besoins en refroidissement. Il convient aussi de trouver un équilibre.

Le ratio d'ouverture au Nord ne crée pas de grande différence. Bien que, plus il augmente, plus le besoin total tend à légèrement augmenter, avec une hausse du besoin en refroidissement et une baisse du besoin en chauffage. Ce dernier étant donc uniquement lié à la quantité d'apport solaire. Bien que les résultats ne montrent pas de grande différence, une ouverture au nord est nécessaire pour la ventilation naturelle.

Les ratios d'ouverture à l'Ouest et à l'Est ne permettent pas de créer une différence significative, ils tendent à augmenter le besoin en refroidissement sans pour autant suffisamment diminuer le besoin en chauffage. De plus, des ajouts ultérieurs sur ces façades permettront d'améliorer l'efficacité énergétique de la maison.

Pour la suite des simulations, sera conservé, un ratio d'ouverture de 0,4 pour la façade Sud, de 0,03 pour la façade Nord et aucune ouverture pour les façades Est et Ouest. Le besoin estimé en chauffage est maintenant de 40 kWh/m².an et de 19 kWh/m².an pour le refroidissement, pour un total de 59 kWh/m².an.

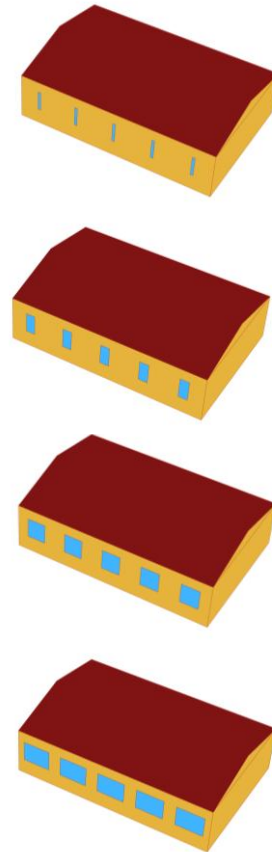


Figure 262 : Différents ratios d'ouverture au Nord simulés (Source : Auteur)

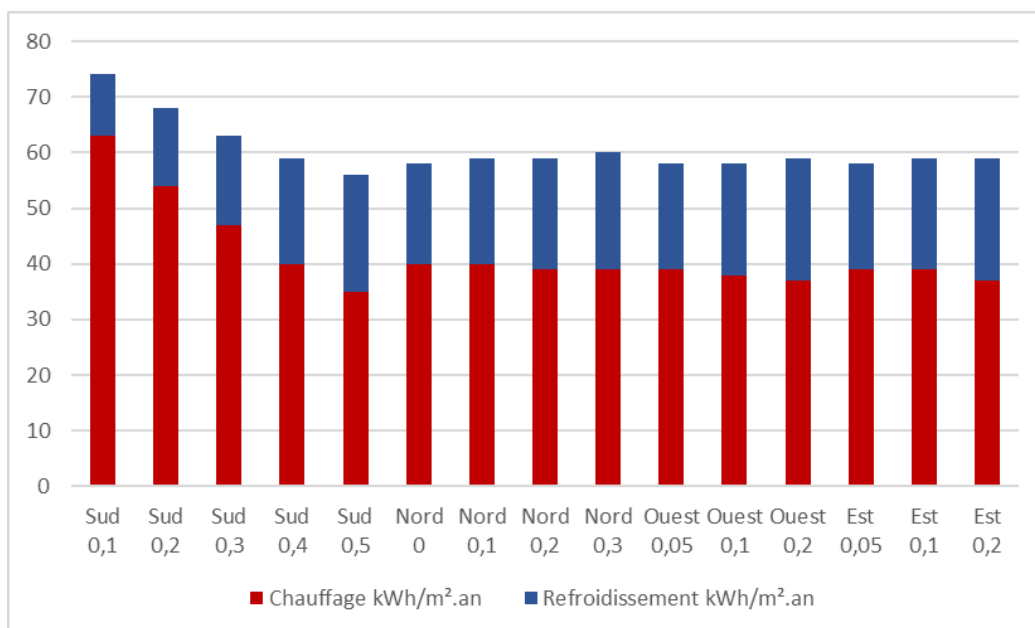


Figure 263 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différents ratios d'ouverture simulés pour chaque orientation dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

5.2.6_ Parois verticales

Cette simulation vient en complément de l'analyse des transferts hygrothermiques à l'échelle de la paroi, dans le but de comprendre l'impact des principales combinaisons étudiées une fois implémentées dans un modèle complet. Cela permet alors de transcrire l'impact sur le besoin estimé en chauffage et refroidissement des différentes parois en pierres.

5.2.6.1_ Zone Nord-Ouest

Pour la Zone Nord-Ouest, la paroi utilisée pour les premières simulations, basées sur l'architecture vernaculaire était une pierre Calcaire tendre de 60cm d'épaisseur.

Le passage de la pierre calcaire tendre avec des valeurs générales aux pierres calcaire de la zone Nord-Ouest avec des valeurs plus précises, montre bien une diminution du besoin en chauffage sans trop augmenter le besoin en refroidissement (Figure 267), traduit par une meilleure isolation et un meilleur stockage de l'énergie dans les parois en pierre. Le logiciel prenant pas en compte les transferts d'humidité dans les parois en pierre ne compte pas le fait que cela induit la conductivité du matériau. La pierre de Saint-Vaast-Fine étant meilleure précédemment est ici légèrement moins efficace face à la pierre de Tuffeau, et ce, dû uniquement à la différence de conductivité thermique. Or dans la réalité, comme vu précédemment, elle est bien plus intéressante. Il conviendra donc de garder la pierre de Saint-Vaast-Fine pour la suite.

Pour une épaisseur de 60cm les besoins estimés sont maintenant de 51 kWh/m².an pour le chauffage, de 8 kWh/m².an pour le refroidissement, pour un total de 59 kWh/m².an.

L'épaisseur de la paroi en pierre induit ici un grand changement (Figure 266), au même titre que précédemment, lors des simulations à l'échelle de la paroi. D'un mur de pierre de 40cm à 60cm, les besoins diminuent de 10 kWh/m².an pour le chauffage et de 4 kWh/m².an pour le refroidissement, ce qui est significatif à l'échelle des résultats obtenus précédemment. Par ailleurs, un ajout supplémentaire de 20cm de pierre (de 60 à 80cm) ne diminue les besoins que de 6 kWh/m².an pour le chauffage et de 3 kWh/m².an pour le refroidissement, cela confirme bien que les changements ne sont pas linéaires. De plus, l'humidité interne de la paroi n'étant pas prise en compte, la différence est diminuée. Quoiqu'il arrive, l'épaississement de la paroi permet une diminution des besoins en chauffage et en refroidissement, représentant un point très important.

Par la suite, l'ajout d'une isolation en béton de chanvre selon de nombreuses combinaisons différentes a pour but de continuer à réduire les besoins en chauffage et refroidissement.

Dans un premier temps, il convient de comparer à nouveau l'isolation par l'intérieur et l'isolation par l'extérieur. Selon les résultats (Figure 264), l'isolation par l'extérieur en béton de chanvre est légèrement plus efficace qu'une isolation par l'intérieur. Mais la différence est minime (en besoin total estimé : 3 kWh/m².an). Cela démontre que l'isolation d'une paroi en pierre avec du béton de chanvre, ne traduit pas un choix définitif d'isolation par l'intérieur ou par l'extérieur.

En complément des simulations précédentes à l'échelle de la paroi, une paroi à double isolation (à épaisseur d'isolant égale) a été envisagée et elle est aussi efficace que l'isolation par l'intérieur. Il est donc démontré que l'isolation par l'extérieur est la plus intéressante. Une option d'isolation par l'extérieur avec un complément intérieur est envisagée et permet de diminuer légèrement les besoins totaux. Un enduit à la chaux de 25mm à l'intérieur et à l'extérieur est ajouté à la paroi doublement isolée de 40cm en pierre de Saint-Vaast Fine. Cette combinaison permet de diminuer les besoins en chauffage et refroidissement.

Un mur double (adapté à la construction avec une épaisseur plus importante que l'autre) avec les mêmes épaisseurs de béton de chanvre et de pierre que pour l'isolation par l'intérieur et l'extérieur est testé. Il est aussi très efficace et se situe entre l'isolation par l'intérieur et l'isolation par l'extérieur. La position (coté intérieur ou extérieur) de la paroi en pierre épaisse n'impactant pas les besoins.

Pour la suite des simulations, le mur en pierre avec une double isolation et des enduits à la chaux est conservé.

Cette solution permet de diminuer drastiquement les déperditions thermiques en réduisant considérablement le besoin en chauffage sans augmenter le besoin en refroidissement, en comparaison à une paroi de 60cm en Calcaire Tendre (Figure 265). Les besoins estimés sont maintenant de 39 kWh/m².an pour le chauffage et de 5 kWh/m².an pour le refroidissement, portant le total à 44 kWh/m².an.

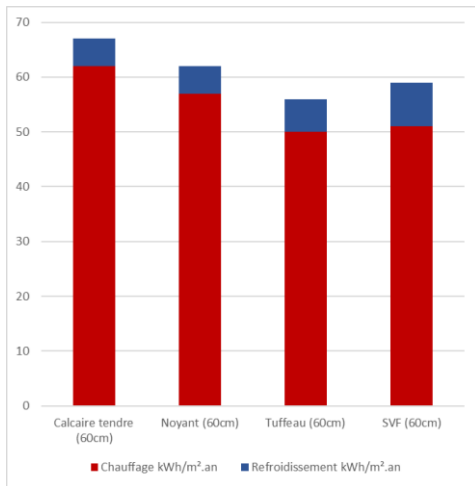


Figure 267 : Comparaison entre différentes pierres (Source : Auteur)

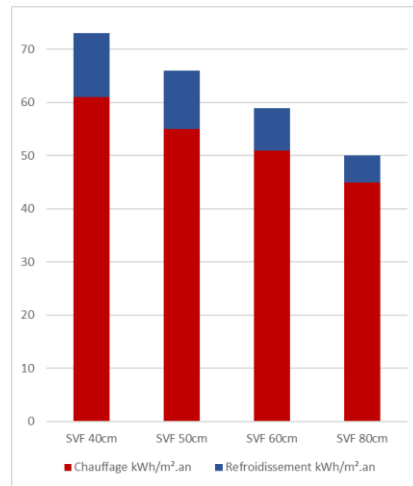


Figure 266 : Comparaison entre différentes épaisseurs (Source : Auteur)

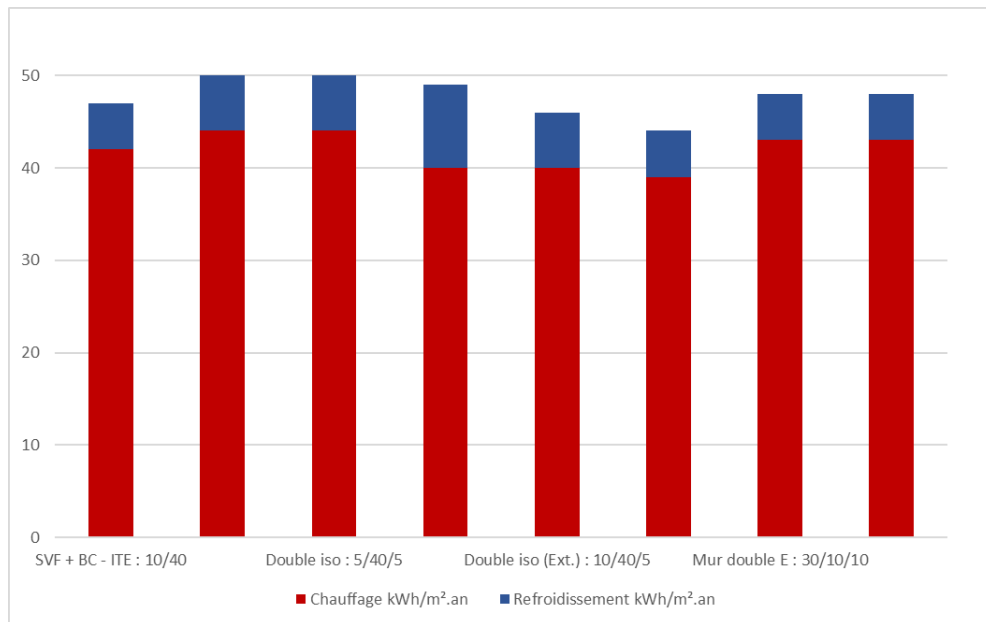


Figure 264 : Comparaison entre différentes combinaisons (Source : Auteur)

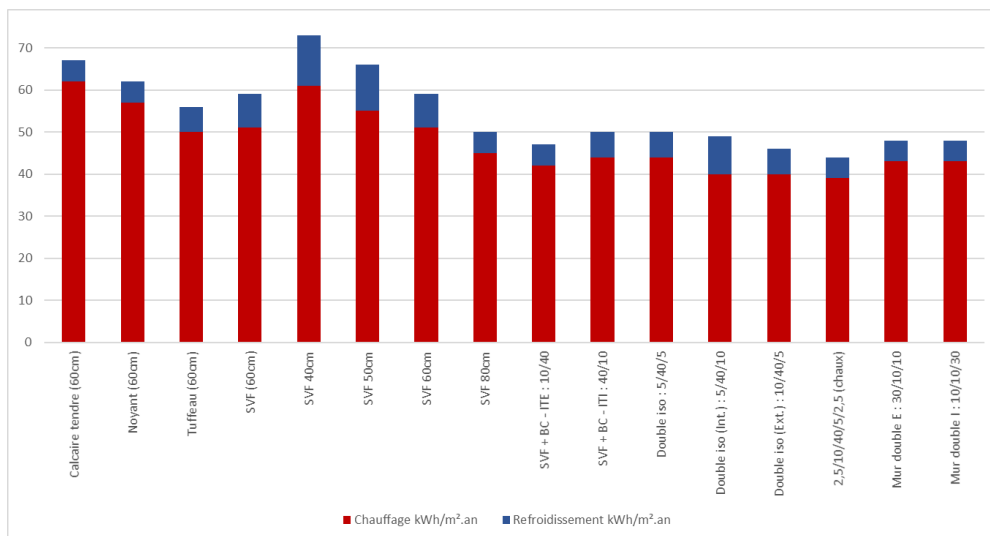


Figure 265 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différentes parois verticales dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

5.2.6.2_ Zone Sud-Est

Pour la Zone Sud-Est, la paroi utilisée pour les premières simulations, basées sur l'architecture vernaculaire était aussi une pierre Calcaire tendre de 60cm d'épaisseur.

Comme pour la zone précédente, les simulations ont été réalisées avec des parois en pierre calcaires de la zone Sud-Est, utilisées précédemment dans l'analyse des transferts à l'échelle de la paroi. Les simulations avec des données plus précises pour ces pierres montrent une faible différence (Figure 271). Les besoins en chauffage ne changent pas pour la pierre de Beaulieu et diminuent légèrement pour la pierre de VPDG. Néanmoins, les deux pierres calcaires permettent une diminution du besoin en refroidissement. Cette faible différence interpelle, en comparaison des résultats de l'expérimentation précédente et des valeurs de U pour ces parois. La pierre de VPDG étant la plus performante ici, et précédemment, la suite des simulations dans cette zone seront réalisées avec cette dernière.

Pour une épaisseur de 60cm les besoins estimés sont maintenant de 37 kWh/m².an pour le chauffage, de 18 kWh/m².an pour le refroidissement, pour un total de 55 kWh/m².an.

Les résultats pour différentes épaisseurs de parois montrent qu'un épaissement permet une diminution significative des besoins en chauffage et en refroidissement (Figure 270). Les résultats sont similaires à ceux obtenus pour la zone Nord-Ouest. Cependant, un passage de 60cm à 80cm diminue autant le besoin en refroidissement qu'un passage de 40cm à 60cm, contrairement au besoin en chauffage qui ne diminue pas de manière linéaire (au même titre que le coefficient de déperdition thermique de la paroi, U). La différence est tout de même importante entre un mur de 40cm d'épaisseur avec un besoin en chauffage estimé à 45 kWh/m².an et en refroidissement à 20 kWh/m².an, et un mur de 80cm avec un besoin en chauffage estimé à 32 kWh/m².an et en refroidissement à 16 kWh/m².an. En revanche, ce n'est pas suffisant.

Par la suite, l'ajout d'une isolation en béton de chanvre selon de nombreuses combinaisons différentes a pour but de continuer à réduire les besoins en chauffage et refroidissement.

Dans la zone Sud-Est aussi, l'isolation par l'extérieure est légèrement plus intéressante que l'isolation par l'intérieur. L'isolation par l'extérieure à un besoin en chauffage inférieure de 2 kWh/m².an et en refroidissement de 1 kWh/m².an en comparaison à l'isolation par l'intérieur. La différence n'est pas si importante. Cependant, l'ajout du béton de chanvre à la paroi en pierre permet de drastiquement diminuer les besoins en

chauffage et en refroidissement de la maison en comparaison à une paroi en pierre non isolée.

Comme précédemment, une paroi complémentaire est simulée, l'isolation double. Cette dernière présente ici des résultats la plaçant encore entre l'isolation par l'intérieur et par l'extérieure. Une double isolation de 5cm de béton de chanvre est donc plus efficace avec une surépaisseur (5cm en plus) à l'extérieure qu'à l'intérieure.

L'isolation double est moins performante que l'isolation par l'extérieure. Comme elle est intéressante pour la régulation hygrométrique on combine les deux. L'isolation double avec surépaisseur à l'extérieure est bien la combinaison la plus efficace. Elle permet de diminuer les besoins de chauffage et de refroidissement. Cette paroi de 40cm de pierre complétée de 10cm de béton de chanvre à l'extérieure et de 5cm de béton de chanvre à l'intérieure permet de diminuer le besoin en refroidissement et en chauffage, en comparaison à une simple isolation par l'extérieure. En ajoutant l'enduit à la chaux à l'intérieure et à l'extérieure, le besoin en chauffage diminue d'1 kWh/m².an.

Les murs doubles sont identiques à ceux simulés pour la zone Nord-Ouest et sont aussi équivalents à une isolation par l'extérieure, en revanche, lorsque la paroi en pierre la plus épaisse est coté intérieure, le besoin en refroidissement est légèrement inférieur.

La paroi en pierre de VPDG de 40cm isolée par l'extérieure de 10cm de béton de chanvre et par l'intérieure de 5cm de béton de chanvre et les enduits à la chaux et conservée pour la suite des simulations, elle présente de bons résultats. En effet, le besoin estimé en chauffage est maintenant de 25 kWh/m².an et de 14 kWh/m².an pour le refroidissement, portant le total à 39 kWh/m².an. L'optimisation de la paroi en pierre, avant de 60cm non isolée en calcaire tendre, a permis de diminuer les besoins en chauffage et refroidissement de 20 kWh/m².an. Représentant une diminution d'environ 35%.

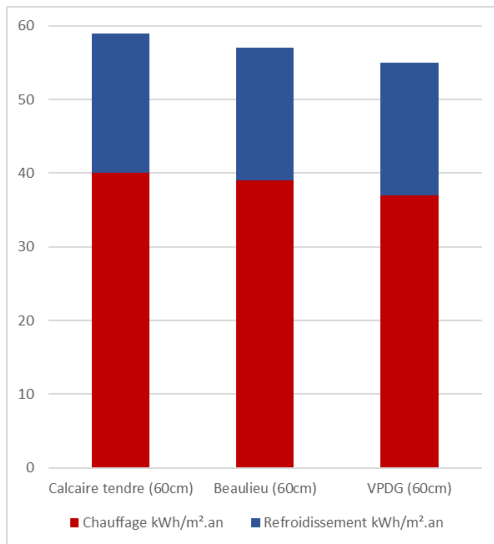


Figure 271 : Comparaison entre différentes pierres (Source : Auteur)

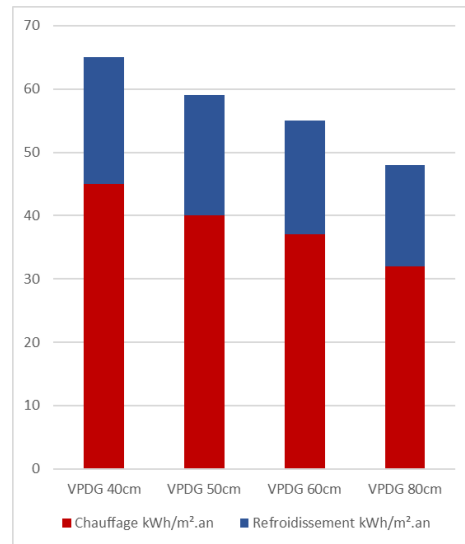


Figure 270 : Comparaison entre différentes épaisseurs (Source : Auteur)

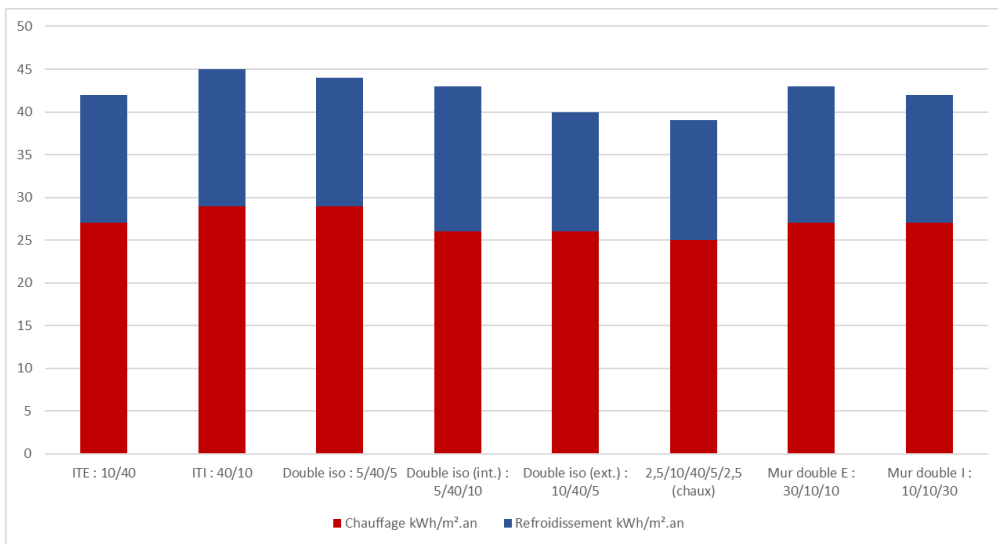


Figure 268 : Comparaison entre différentes combinaisons (Source : Auteur)

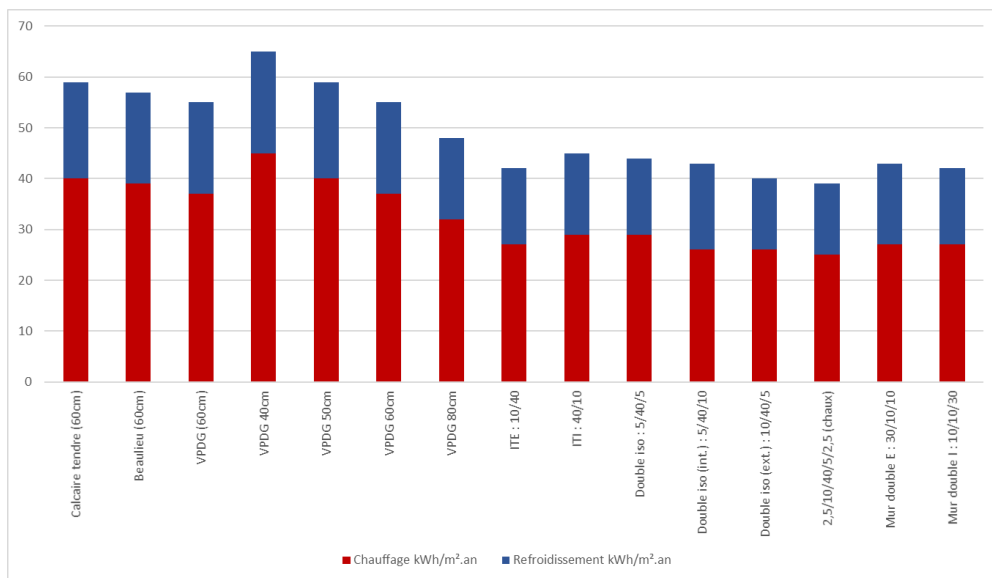


Figure 269 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différentes parois verticales dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

5.2.6_ Sol et sous-sol

Cette simulation a pour but de mesurer l'impact du matériau employé pour le sol de la maison. Dans les STD, dans HoneyBee, les échanges avec le sol sont comptés avec des données sur la température du sol selon la zone climatique. Le sol reçoit la majeure partie des rayonnements solaires provenant des ouvertures, échanges par conduction avec une température de sol variant faiblement entre les saisons. Le sol est une paroi déperditive ou au contraire permettant de générer des apports, sa matière représente aussi un potentiel moyen de stocker l'énergie solaire. Il est donc important de mesurer l'impact que ce dernier peut avoir sur les besoins en chauffage et refroidissement.

Le sol étant jusque-là en calcaire tendre d'une épaisseur de 30cm, il sera adapté avec la pierre utilisée pour les parois verticales puis en béton isolé ainsi qu'avec un vide sanitaire sous un plancher en bois isolé.

5.2.6.1_ Zone Nord-Ouest

Dans la zone Nord-Ouest, on remarque que plus le sol est isolé, plus le besoin en refroidissement augmente et plus le besoin en chauffage diminue.

Les déperditions sont alors limitées si le sol est isolé, réduisant les besoins en chauffage l'hiver mais augmentant les besoins en refroidissement l'été. Dans un climat tempéré comme le Nord-Ouest de la France, la surchauffe en été peu facilement être causée lorsque la maison est trop isolée. On remarque bien qu'ici, un vide sanitaire (Figure 272) sous une maison avec un plancher bois isolé (comme entre le premier niveau et les combles) augmente fortement les besoins en refroidissement. De plus, le stockage et la restitution de l'énergie disparaît.

Néanmoins, l'utilisation d'une pierre plus isolante comme la pierre de Saint Vaast Fine, permet de réduire le besoin en chauffage à 34 kWh/m².an, le besoin en refroidissement augmente à 9 kWh/m².an pour un besoin total de 43 kWh/m².an (Figure 273).

Lorsque le sol en pierre de Saint Vaast Fine est épaissi, le total des besoins reste identique, néanmoins le besoin en chauffage est plus faible et le besoin en refroidissement plus important.

5.2.6.2_ Zone Sud-Est

De la même manière, dans la zone Sud-Est, on remarque que plus le sol est isolé, plus le besoin en refroidissement augmente et plus le besoin en chauffage diminue. En revanche, la relation n'est

pas égale, une isolation du plancher induit un besoin en refroidissement très important, augmentant les besoins totaux en comparaison à un sol en pierre non isolé. L'utilisation de la pierre de VPDG au lieu de la pierre calcaire tendre ne présente pas de différence dans les besoins en chauffage et refroidissement. De ce faite, l'utilisation de la pierre de VPDG sera conservée pour la suite, elle permet de réduire le besoin en chauffage à 23 kWh/m².an, le besoin en refroidissement augmente à 17 kWh/m².an pour un besoin total de 40 kWh/m².an (Figure 275).

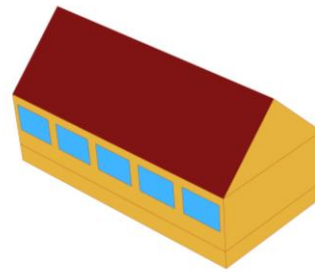


Figure 272 : Modèle 3D avec sous-sol dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

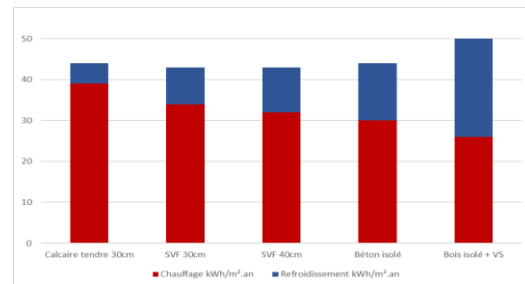


Figure 273 : Comparaison entre les différentes solutions pour le sol dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

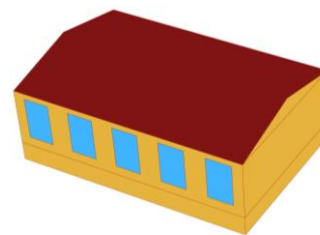


Figure 274 : Modèle 3D avec sous-sol dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

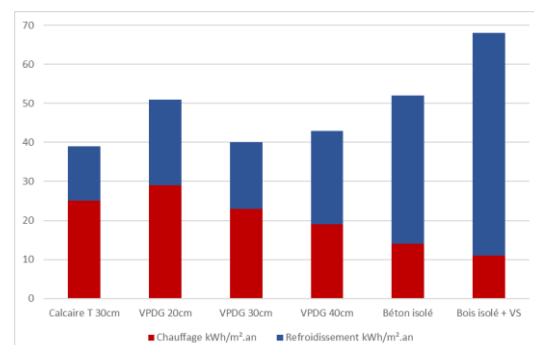


Figure 275 : Comparaison entre les différentes solutions pour le sol dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

5.2.7_ Protection solaire fenêtres

Cette simulation a pour but de mesurer l'impact d'une protection solaire sur les fenêtres de la maison. Ces protections sont représentées par une extrusion tout autour de la fenêtre, représentant la position de la fenêtre dans l'épaisseur de la paroi. En effet, les simulations dans Honeybee sont réalisées à partir de surfaces sans épaisseurs, ne prenant donc pas en compte la possibilité que le vitrage soit en retrait de la façade.

5.2.7.1_ Zone Nord-Ouest

Pour les premières simulations dans la zone Nord-Ouest, la fenêtre est donc considérée comme placée à l'extrémité extérieure. Sont donc simulés ces extrusions pour différentes longueur (Figure 276).

Les résultats des simulations montrent un changement non linéaire entre les différentes distances de la surface extérieure. De manière générale, plus la fenêtre est éloignée de la surface extérieure plus le besoin en chauffage est important et plus le besoin en refroidissement diminue.

En revanche, la déplacer de ne serait-ce que 5 centimètres, augmente le besoin en chauffage et le besoin en refroidissement. Une fois les 20cm atteints, le besoin en refroidissement chute fortement, sûrement car une partie des apports solaires en été est considérablement réduit, en revanche, le besoin en chauffage augmente. L'ajout de cette protection solaire ne permet pas une diminution des besoins énergétiques.

La fenêtre reste donc à la surface extérieure pour la suite des simulations.

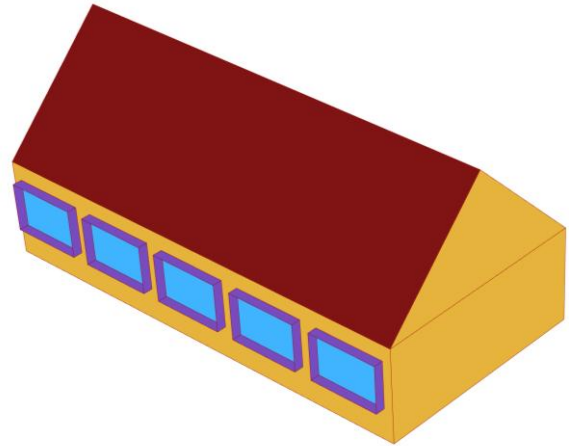


Figure 276 : Maisons simulées selon les différentes protections solaires, ici 30cm, dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

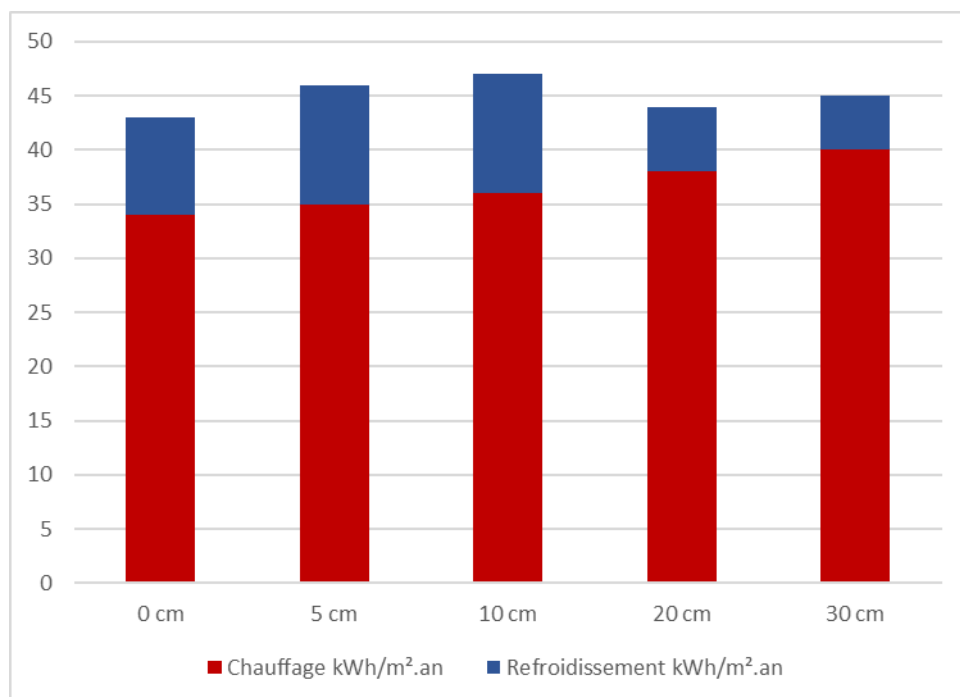


Figure 277 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différentes distances entre le vitrage et la surface extérieure dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

5.2.8_ Pièces avec usages

Cette étape montre la transition entre le modèle paramétrique réalisé à l'aide d'un script Grasshopper dont les dimensions et paramètres sont très facilement modifiable sans grand impact sur les autres, et le modèle Rhino. En effet, pour réaliser un modèle énergétique d'une maison découpée en pièces, il est plus simple de passer par la modélisation sur Rhino qui elle n'est plus paramétrique. La définition des paramètres précédents sera donc principalement figée pour la suite des simulations énergétiques.

5.2.8.1_ Zone Nord-Ouest

La modélisation de la maison a donc été faite selon les solutions passives présentés en partie 3.1.3 et selon la forme définie précédemment. En s'inspirant de la réalisation représentée par la Figure 32, adapté et montré par la Figure 33. La conception du plan de la maison n'est pas optimale et abouti, le but étant de rester simple afin d'étudier rapidement l'impact de certaines décisions.

Les pièces principales dont le séjour et la salle à manger sont orientées au Sud, ainsi que l'entrée et une des chambres. Les chambres sont, elles, orientées à l'Est. On retrouve à l'Ouest, la salle à manger et la cuisine, qui fait aussi face au Nord avec les pièces d'usage secondaire comme la salle de bain, laverie et une pièce de stockage. L'objectif étant de placer les plus grandes pièces au sud pour maximiser l'apport solaire dans ces dernières, ce sont aussi les plus utilisées. Tandis que les pièces utilisées plus ponctuellement sont placés au Nord, servant presque d'espace tampon. (Voir plan)

Le résultat de la simulation de cette maison (Figure 280) démontre une augmentation (Figure 279) du besoin estimé en chauffage à 43 kWh/m².an et en refroidissement à 16 kWh/m².an, portant le total à 59 kWh/m².an. Contrairement à 43 kWh/m².an pour la dernière situation.

Ceci peut s'expliquer par le fait que la délimitation de pièces limite la ventilation naturelle, limite

principalement les apports solaires à la pièce comportant la fenêtre et donc isole chaque pièce les unes des autres.

Certes, la simulation précédente n'était que peu réaliste, représentant alors une grande pièce de 100m².

Pour cette maison, la Figure 278 montre un apport solaire conséquent toute l'année, permis par les grandes ouvertures au Sud. La masse en pierre représenté par les parois verticales et le sol permet alors de stocker de l'énergie, on le voit bien avec le stockage de la chaleur qui s'effectue en milieu de journée (en partie négative) et qui est restituée en soirée, durant la nuit, et même en matinée.

Cette maison et disposition spatiale sera alors gardée pour la suite des simulations à réaliser.

La Figure 281 permet de démontrer qu'en moyenne la température intérieure est bien à 20°C pour l'année (car considéré comme maison chauffée). La température des surfaces intérieures des parois est elle aussi très élevée, entre 19°C et 20°C.

Cette simulation permet de démontrer la complexité de l'analyse de l'équilibre des charges thermiques.

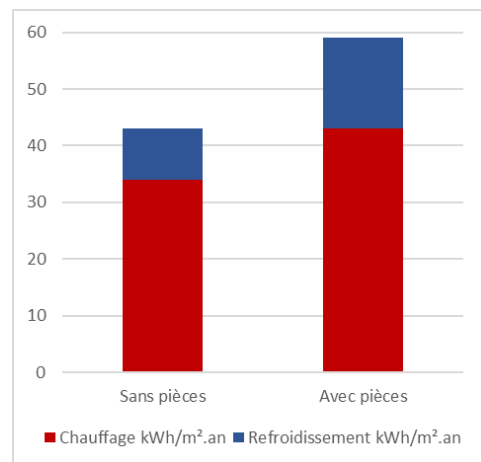


Figure 279 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement avec et sans pièces dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

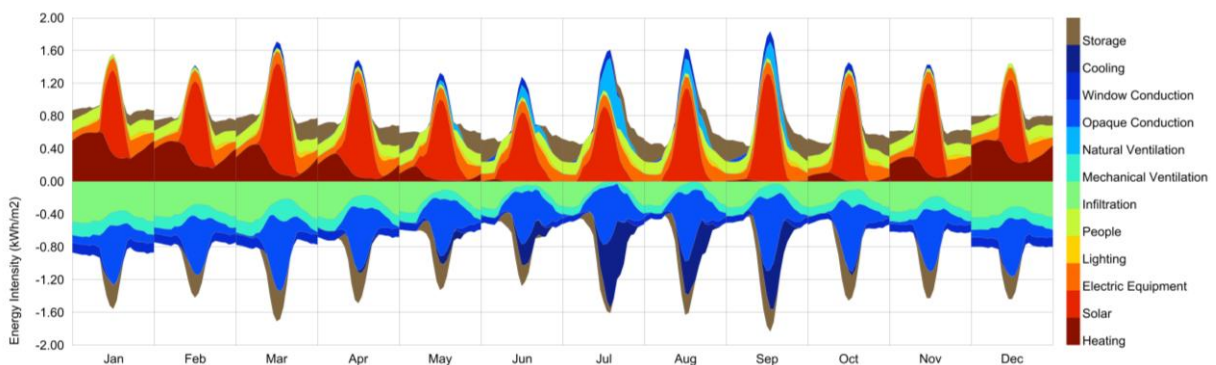


Figure 278 : Équilibre des charges thermiques de la maison théorique avec pièces dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

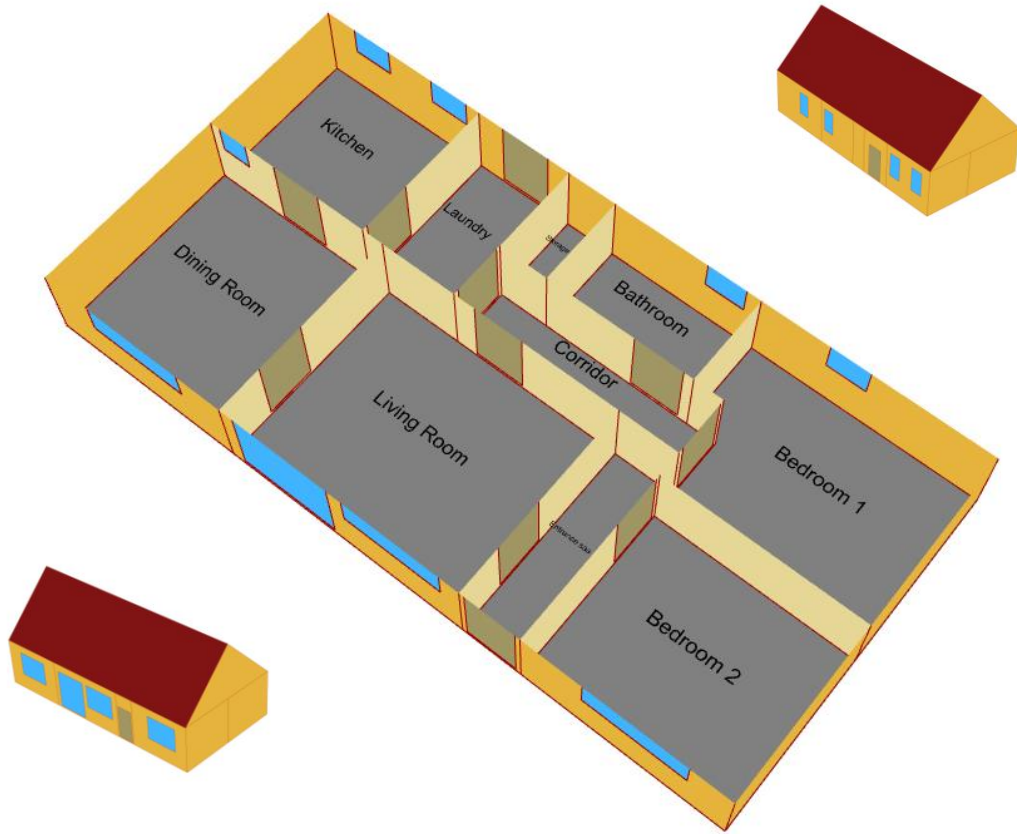


Figure 280 : Visualisation du modèle 3D de la STD de la maison avec pièces de la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

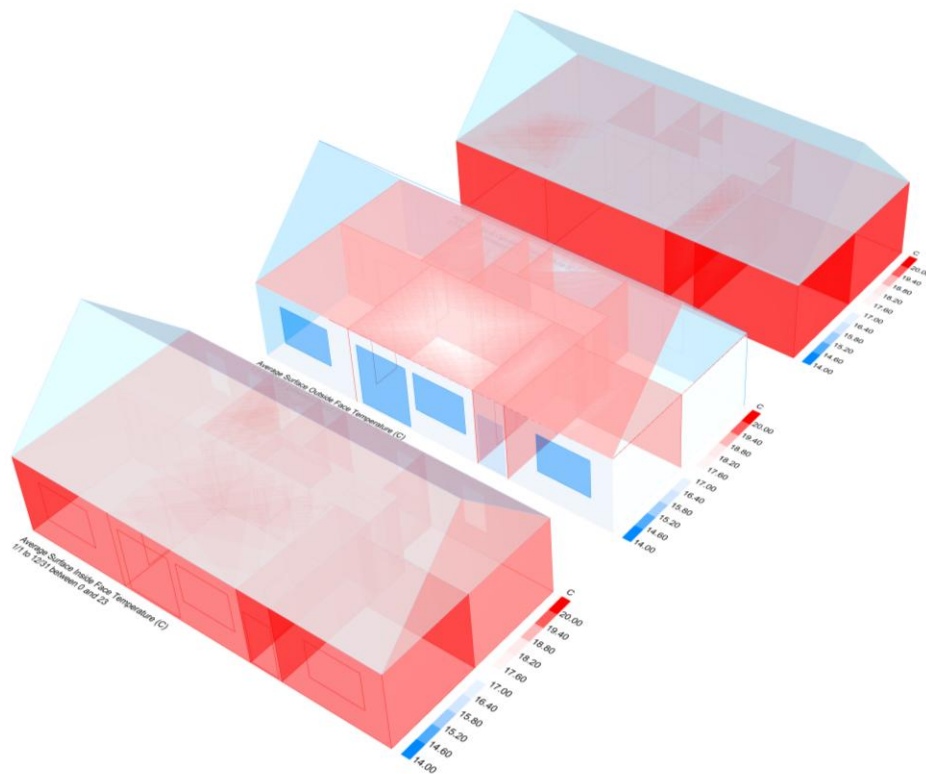


Figure 281 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur)

5.2.8.2_ Zone Sud-Est

La simulation de la maison avec la disposition des pièces intérieures est aussi réalisée pour la maison de la zone Sud-Est.

La modélisation de la maison a aussi été faite selon les solutions passives présentés en partie 3.1.3 et selon la forme définie précédemment (propre à la zone, avec le ratio 1.5_1). En s'inspirant de la réalisation représentée par la Figure 32, adapté et montré par la Figure 33. Pour rappel, comme précédemment, la conception du plan de la maison ne représente pas une conception optimale et aboutie.

Les pièces principales dont le séjour et la salle à manger sont orientées au Sud, ainsi que l'entrée et une des chambres. Les chambres sont, elles, orientées à l'Est. On retrouve à l'Ouest, la salle à manger et la cuisine, qui fait aussi face au Nord avec les pièces d'usage secondaire comme la salle de bain, laverie et une pièce de stockage. L'objectif étant de placer les plus grandes pièces au sud pour maximiser l'apport solaire dans ces dernières, ce sont aussi les plus utilisées. Tandis que les pièces utilisées plus ponctuellement sont placés au Nord, servant presque d'espace tampon (Figure 284).

Au même titre que précédemment, les besoins estimés en chauffage et refroidissement augmentent (Figure 282) pour la maison avec une répartition spatiale en pièces. Le besoin estimé en chauffage augmente à 30 kWh/m².an, celui en refroidissement augmente à 28 kWh/m².an, portant le total à 58 kWh/m².an. Pour cette zone, la différence est encore plus importante.

Le besoin en refroidissement devient très important et est pourtant toujours concentré sur les 4 mois où il n'y a aucun besoin en chauffage. Comme pour la zone Nord-Ouest, la délimitation en pièces limite la possibilité de ventilation naturelle et les stabilisations de températures entre les pièces. Les pièces au Nord sont alors moins chauffées et les pièces au Sud le sont trop.

La Figure 283 montre que l'apport solaire est conséquent en hiver et même plus important qu'en été, le pic d'apport d'énergie est plus court mais plus intense. Le stockage de l'énergie dans la masse de la maison s'effectue à cet instant, elle est alors restituée le reste du temps à l'intérieur.

Cette maison et disposition spatiale sera alors gardée pour la suite des simulations à réaliser dans cette zone.

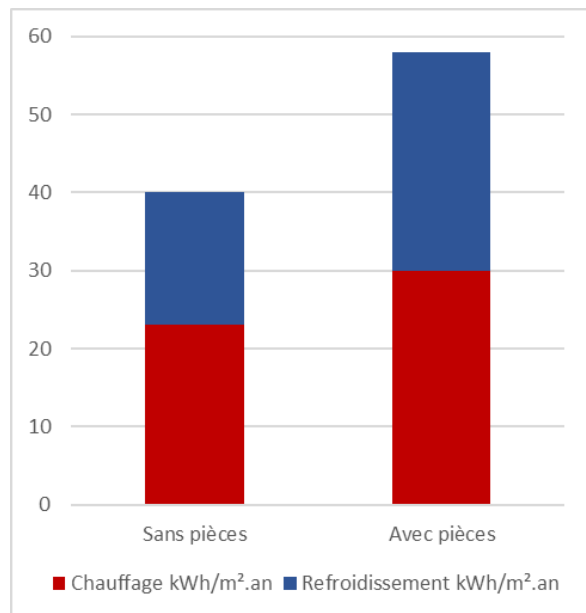


Figure 282 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement avec et sans pièces dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

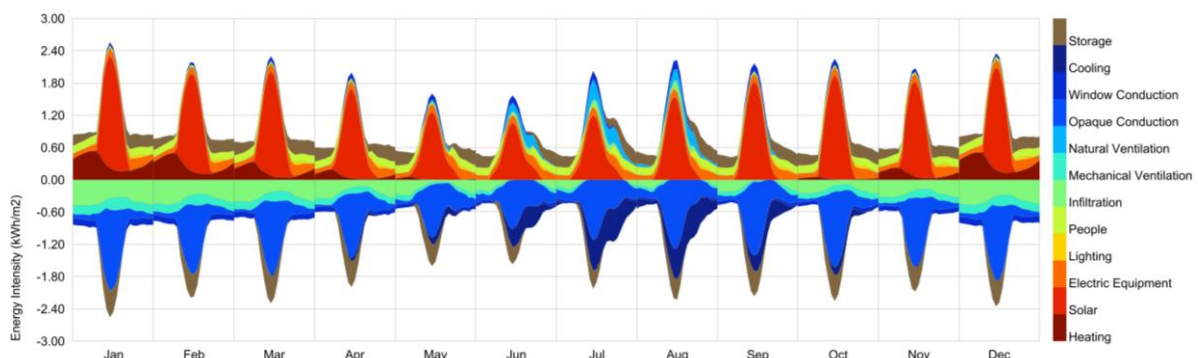


Figure 283 : Équilibre des charges thermiques de la maison théorique avec pièces dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

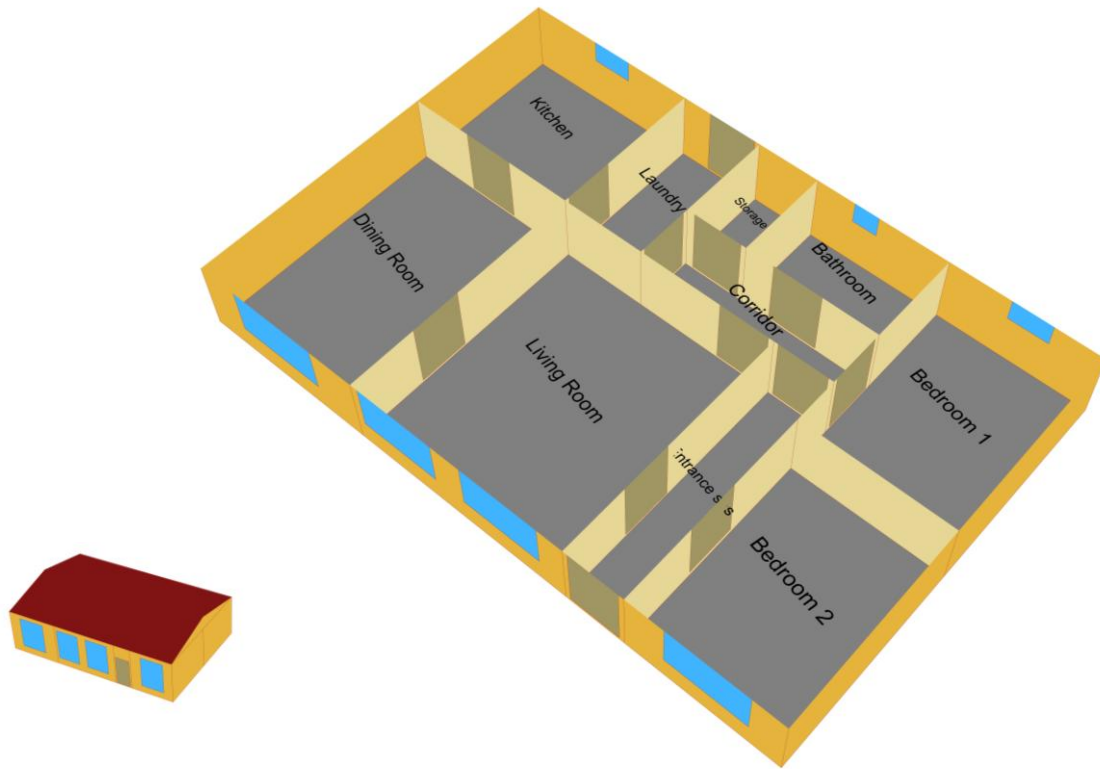


Figure 284 : Visualisation du modèle 3D de la STD de la maison avec pièces de la zone Sud-Est (Source : Auteur)

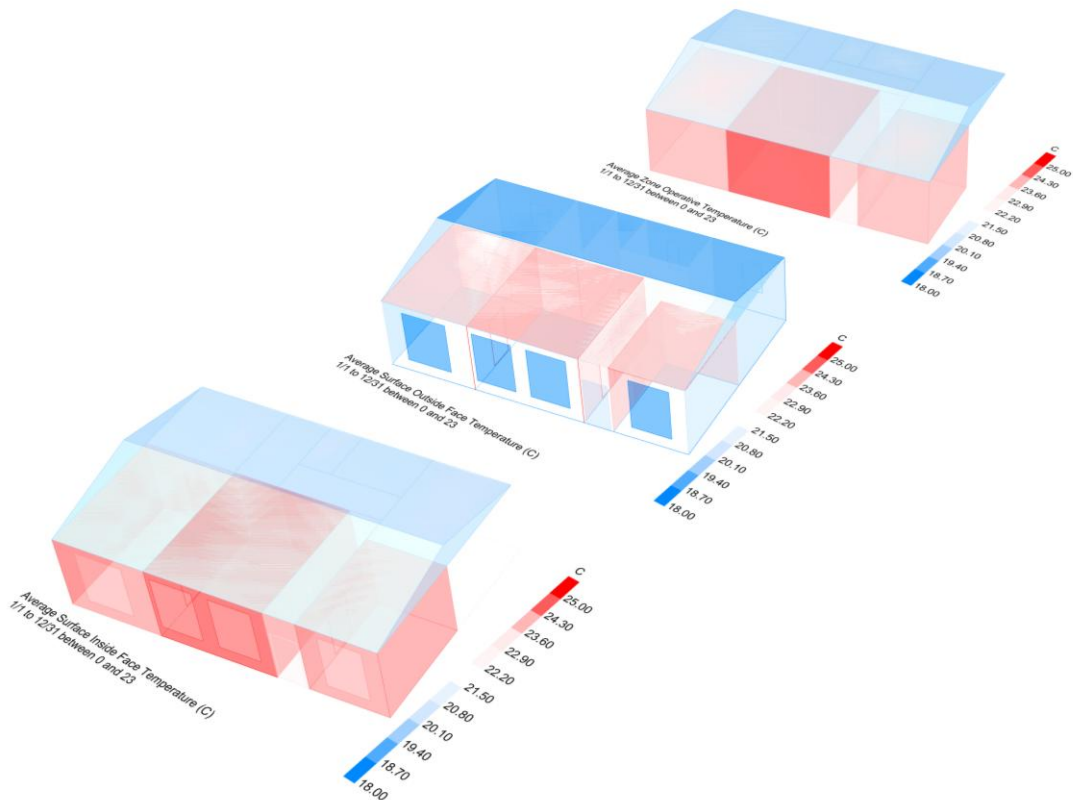


Figure 285 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur)

5.2.9_ Solutions passives

Cette a pour but de poursuivre les simulations avec la maison déterminée précédemment en y intégrant des solutions passives. Le but étant de mesurer l'impact de solutions additionnelles apportées à une maison ayant une disposition spatiale 'figée'.

5.2.9.1_ Zone Nord-Ouest

En effet, la maison présente encore des améliorations possibles. Pour la zone Nord-Ouest, l'ajout de ces solutions se base sur la présentation des solutions passives réalisée en partie 3.1.3, sur les besoins en lien avec la condition climatique présentés en partie 4.2.1.1 et sur les simulations précédentes. Les solutions passives sont représentées par l'ajout d'un espace tampon à l'Ouest, l'ajout d'un mur Trombe à l'est, le matériau pour les parois internes ainsi qu'une protection solaire supplémentaire pour les ouvertures au Sud.

Espace tampon à l'Ouest

Dans un premier temps, l'ajout d'un espace tampon à l'Ouest est modélisé par deux pièces en extension de la maison, une orientée au Sud avec deux parois entièrement vitrées, une véranda, et une autre pièce fermée au Nord, pouvant servir de stockage (Figure 286).

L'ajout d'une véranda permet en théorie d'avoir une pièce bien ventilée en été et une pièce chauffée par le soleil en hiver. Cette pièce n'est pas chauffée et ne comporte aucun programme (apports internes), elle est uniquement chauffée par le soleil et n'est pas compté dans la surface habitable. Cette Véranda est complétée d'une pièce opaque au nord pour limiter les déperditions thermiques (Figure 286).

Cet ajout permet de diminuer de 10 kWh/m².an le besoin en chauffage et de 7 kWh/m².an le besoin en refroidissement, le total étant maintenant de 42 kWh/m².an, contre 59 kWh/m².an précédemment (Figure 288).

Le graphique (Figure équilibre charge thermique) montre que le stockage dans les parois en pierre a fortement augmenté tout en continuant à être réparti. L'inertie bien gérée permet donc de réduire les besoins en chauffage et en refroidissement.

Le mur en pierre entre la maison et la véranda et la pièce de stockage a été considéré comme un mur en pierre non isolé de 60cm en pierre de SVF. On remarque sur la visualisation 3D que la température annuelle de la véranda à l'ouest est de 24°C comme la température de la surface intérieure de la paroi, ce qui est bien supérieur que les autres pièces de la maison. L'ajustement de l'échelle permet aussi de réaliser que les pièces à l'est et au nord sont en moyenne plus froide dû à un plus faible apport solaire et de fortes déperditions.

Mur Trombe à l'Est

Dans un second temps, l'ajout d'un espace tampon à l'est est modélisé par un mur trombe, qui a pour objectif de créer une serre sur le mur en pierre en contact avec l'extérieur. Un système de ventilation avec deux fenêtres en haut et en bas permet de rendre possible une ventilation de l'espace entre le verre et la pierre pour limiter la chauffe en été. L'ajout de ce dispositif permet de diminuer le besoin en chauffage à 22 kWh/m².an, mais cela augmente légèrement le besoin en refroidissement à 12 kWh/m².an, pour un total qui diminue, à 34 kWh/m².an.

On remarque que les gains par apports solaires augmentent et que les besoins en chauffages sont presque entièrement remplis par les apports solaires qui transmettent l'énergie à la masse du bâtiment la restituant lorsque nécessaire (inertie). La quantité d'énergie délivrée par l'inertie durant la nuit permet presque de se passer de chauffage. Le mur trombe présente une surface intérieure très chaude et une température de pièce moyenne de 24°C sur l'année.

Paroi interne

Dans un troisième temps, la modification des parois internes auparavant en plâtre à de la pierre a pour but de voir l'impact de l'ajout de masse et d'épaisseur à l'intérieur de la maison. On remarque que pour une épaisseur supérieure ou égale à 20cm, ce changement n'a pas d'impact majeur sur les besoins en chauffage et refroidissement.

Protection solaire

Dans un quatrième temps, un brise-soleil de 30cm a été ajouté au-dessus des fenêtres au Sud. Cette solution n'a eu qu'un impact très faible sur les besoins énergétiques. Nous gardons tout de même ce dispositif qui permet de baisser le besoin en refroidissement à 11 kWh/m².an.

L'ajout de ces différentes solutions permet de diminuer les besoins en chauffage et refroidissement pour arriver à un besoin en chauffage de 24 kWh/m².an, en refroidissement de 11 kWh/m².an et un total de 35 kWh/m².an.

Une simulation a été réalisée avec la même maison que la simulation précédente mais avec des murs en pierre non isolés de 60cm en pierre de Saint Vaast Fine. Les besoins en chauffages remontent à 32 kWh/m².an mais les besoins en refroidissement baissent légèrement à 10 kWh/m².an avec un total de 42 kWh/m².an. Cependant, les besoins restent tout de même faibles suites aux améliorations utilisées.

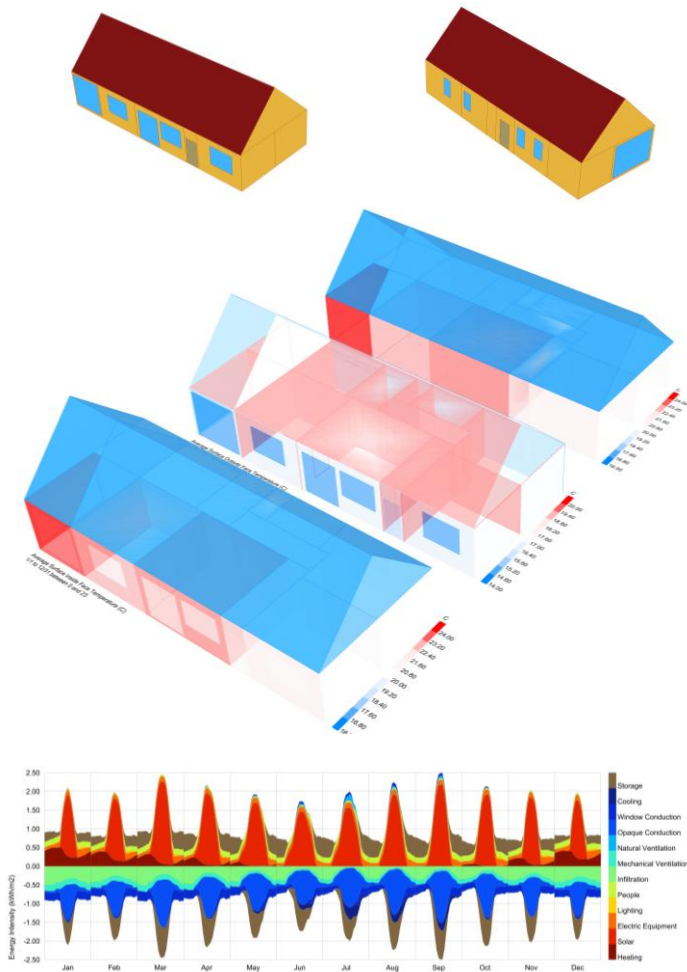


Figure 286 : Modélisation 3D, Visualisation 3D et équilibre des charges thermiques après ajout de l'espace tampon à l'Ouest (Source : Auteur)

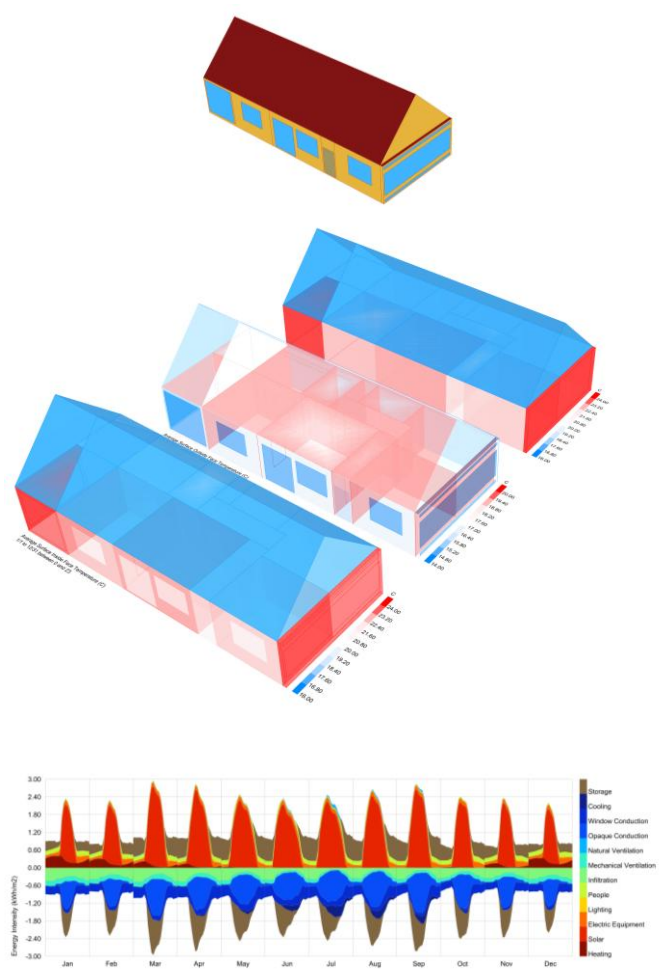


Figure 287 : Modélisation 3D, Visualisation 3D et équilibre des charges thermiques après ajout du mur Trombe à l'Est (Source : Auteur)

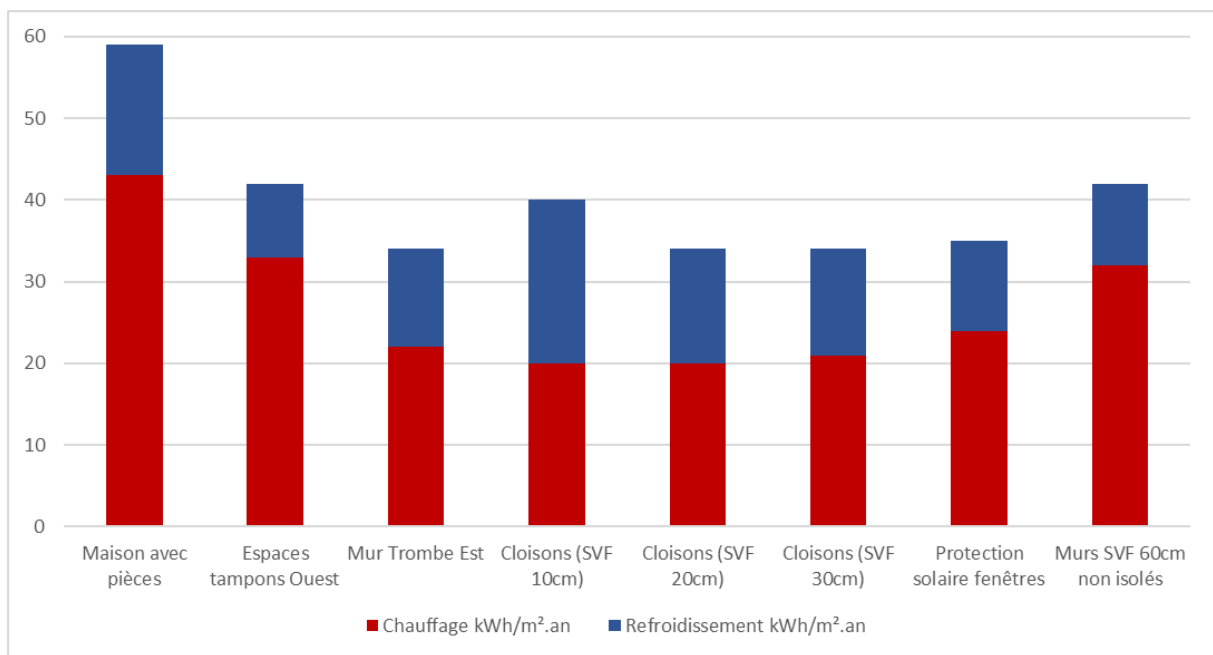


Figure 288 : Évolution des besoins en chauffage et en refroidissement avec les différentes solutions passives (Source : Auteur)

5.2.9.2_ Zone Sud-Est

Pour la zone Sud-Est, la maison peut aussi être encore adaptée dans le but de réduire les besoins en chauffage et refroidissement. L'ajout de ces solutions se base aussi sur les éléments présentés plus tôt dans ce mémoire ainsi que sur les simulations précédentes. Les solutions passives sont représentées par l'ajout de protections solaires au Sud, d'un espace tampon à l'Ouest, le matériau des parois internes ainsi que l'ajout de végétation.

Protection solaire

Dans la zone Sud-Est, l'objectif est principalement de limiter le besoin en refroidissement en été. Ce dernier étant très important depuis l'ajout des pièces dans la maison.

Les protections solaires sont modélisées de 3 manières, extension de la toiture, brise soleil au-dessus des ouvertures au sud et une pergola le long de la façade sud.

Dans un premier temps, l'extension de la toiture (Figure 289) est ici de 7 cm et a pour but de protéger la façade des rayons de soleil en été lorsque ce dernier est haut dans le ciel. Cet ajout permet de diminuer de 4 kWh/m².an le besoin en refroidissement et de 1 kWh/m².an le besoin en chauffage.

Dans un second temps, l'ajout de brise-soleil au-dessus des ouvertures au sud (Figure 290) a le même objectif que pour l'extension de toiture mais uniquement sur les ouvertures. Plusieurs longueurs sont simulées et plus la longueur est importante plus le besoin en refroidissement diminue, bien que la différence soit faible. Un brise-soleil de 40cm de long est conservé et diminue de 5 kWh/m².an le besoin en refroidissement, cependant le besoin en chauffage augmente de 2 kWh/m².an.

Enfin, l'ajout d'une pergola sur la façade sud (Figure 291) est simulé dans le même objectif de réduire les apports solaires. Néanmoins, son ajout augmente le besoin en chauffage de 4 kWh/m².an et le besoin en refroidissement de 2 kWh/m².an. Cette solution n'est alors pas conservée.

L'extension de toiture et les brises soleil sont donc conservés, le besoin en chauffage est maintenant de 23 kWh/m².an, celui en refroidissement de 24 kWh/m².an, pour un total de 47 kWh/m².an.

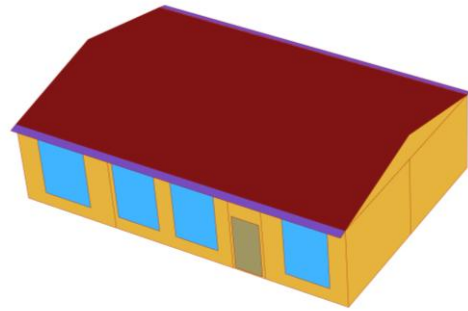


Figure 289 : Modèle 3D de la STD de la maison avec la protection solaire en toiture (Source : Auteur)

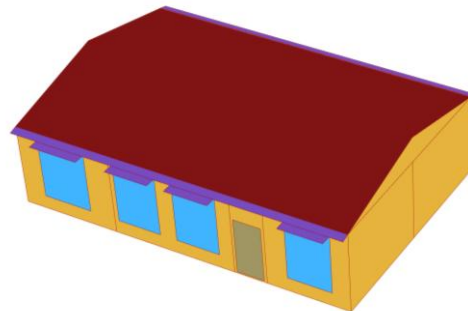


Figure 290 : Modèle 3D de la STD de la maison avec la protection solaire en toiture et les brise-soleils au Sud (Source : Auteur)

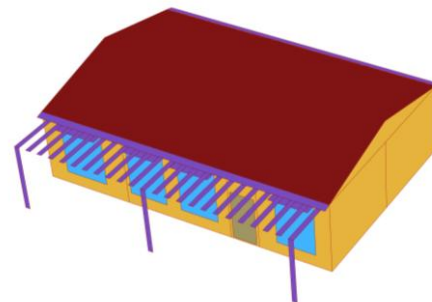


Figure 291 : Modèle 3D de la STD de la maison avec la protection solaire en toiture, les brise-soleils au Sud et la Pergola au Sud (Source : Auteur)

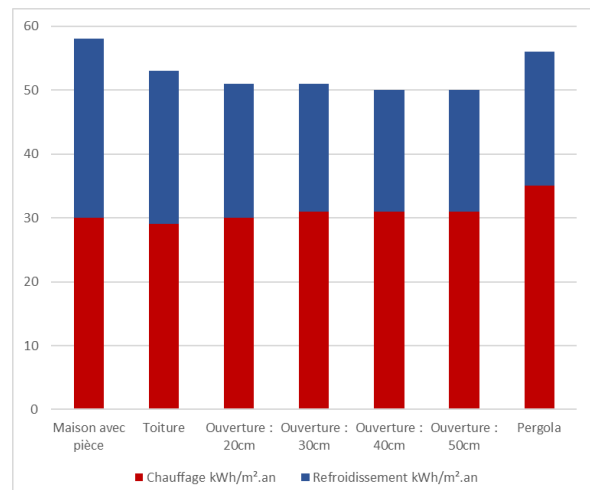


Figure 292 : Évolution des besoins en chauffage et en refroidissement avec les différentes protections solaires (Source : Auteur)

Espace tampon Ouest

L'ajout d'un espace tampon à l'Ouest sans ouverture a pour but de réduire les déperditions thermiques en hiver et les apports en été. L'ensemble des parois de l'espace tampon est en pierre isolée par béton de chanvre comme simulé précédemment. Cette espace tampon peut être ventilé naturellement avec une porte au Sud et une petite ouverture au Nord. Cette pièce n'est pas chauffée, ni comptée dans la surface habitable, elle peut représenter un garage ou une pièce de stockage.

Cet ajout permet de diminuer le besoin en chauffage de 8 kWh/m².an, mais augmente le besoin en refroidissement de 5 kWh/m².an. Cet espace tampon permet donc d'améliorer l'efficacité de cette maison mais n'est pas la solution optimale. Elle est tout de même conservée.

L'utilisation de la pierre comme paroi interne induit une augmentation du besoin en refroidissement et ne permet pas de diminuer le besoin en chauffage, cette solution n'est pas pertinente.

Enfin, l'ajout d'arbres créant un masque solaire sur la maison augmentent le besoin en chauffage de 9 kWh/m².an et ne diminue le besoin en refroidissement que de 6 kWh/m².an, ne permettant pas d'améliorer le total. Honeybee prends cette modélisation en compte uniquement en tant qu'ombrage et n'influence aucun autre paramètre.

Uniquement l'espace tampon à l'Ouest est conservé, le besoin en chauffage est maintenant de 23 kWh/m².an, celui en refroidissement de 24 kWh/m².an pour un total de 47 kWh/m².an.

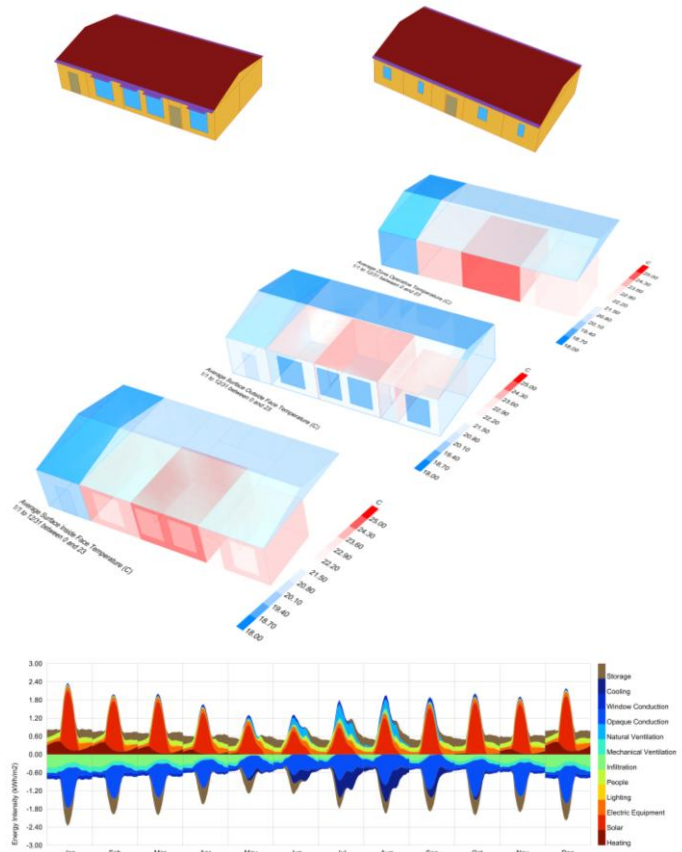


Figure 293 : Modélisation 3D, Visualisation 3D et équilibre de charges thermiques après ajout de l'espace tampon à l'Ouest (Source : Auteur)

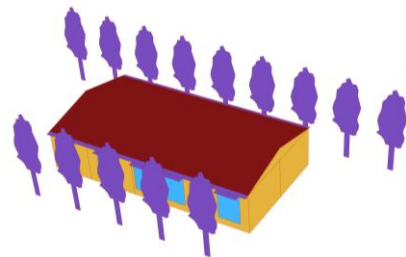


Figure 294 : Modélisation 3D après ajout de la végétation (Source : Auteur)

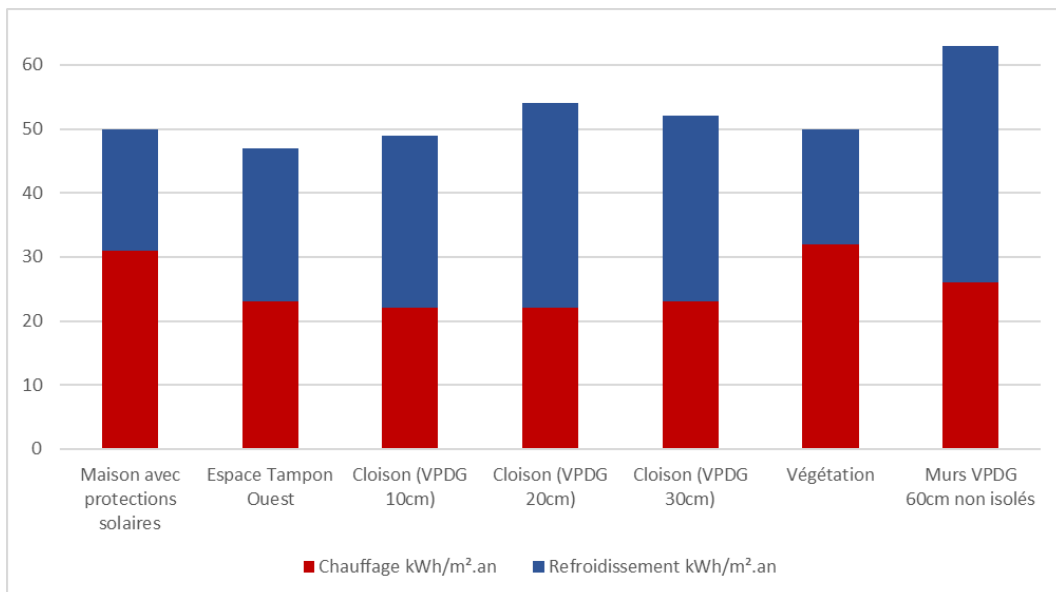


Figure 295 : Évolution des besoins en chauffage et en refroidissement avec les différentes solutions passives (Source : Auteur)

5.2.10_ Vernaculaire amélioré

Cette simulation a pour but de reprendre la forme vernaculaire mais de lui attribuer les parois opaques de la forme optimisée trouvée précédemment. Et ceci afin de voir si en gardant la même forme mais juste en changeant les parois, cela serait suffisant pour réduire les besoins énergétiques.

5.2.10.1_ Zone Nord-Ouest

Dans la zone Nord-Ouest, seule la composition de paroi est adaptée. Et passe donc d'une paroi de 60cm d'épaisseur en pierre de Calcaire Tendre à une paroi de 60cm d'épaisseur composée de 40cm de pierre de Saint-Vaast-Fine, de 15cm de béton de chanvre réparti entre intérieur et extérieur et de 25mm d'enduit à la chaux à l'intérieur et à l'extérieur. Le sol passe de 30cm de calcaire tendre à 30cm de pierre de SVF et les parois internes sont désormais en plâtre. Le reste est inchangé.

Le besoin en chauffage diminue drastiquement et passe de 115 kWh/m².an à 73 kWh/m².an, le besoin en refroidissement de 2 à 3 kWh/m².an pour un total de maintenant 76 kWh/m².an. Ce total a donc diminué d'environ 33%. L'optimisation des parois en pierre permet alors par un simple ajout de béton de chanvre de fortement diminuer le besoin en chauffage en limitant les déperditions thermiques en hiver. Cependant, ce total est toujours important est supérieur à la maison théorique modélisée précédemment présentant un total de 35 kWh/m².an, et ce, avec la même composition de paroi.

Cette simulation permet de démontrer que l'optimisation de la paroi permet bel et bien d'optimiser le confort hygrothermique et de réduire la consommation liée au chauffage d'une maison en pierre. Pour autant, la conception architecturale influence aussi fortement les besoins en chauffage et refroidissement.

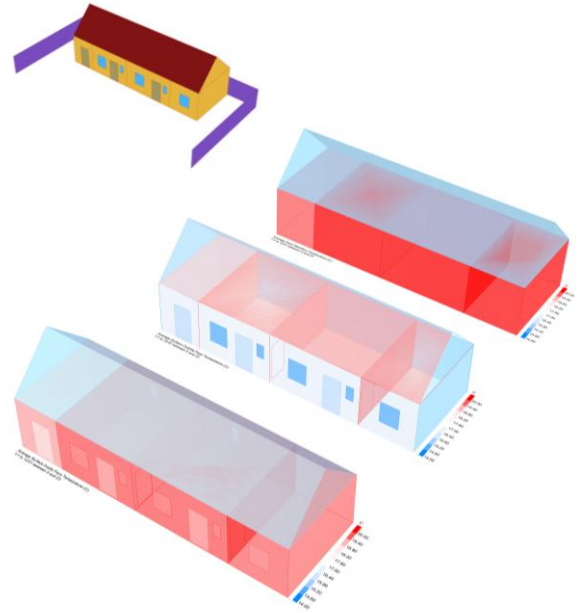


Figure 296 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur)

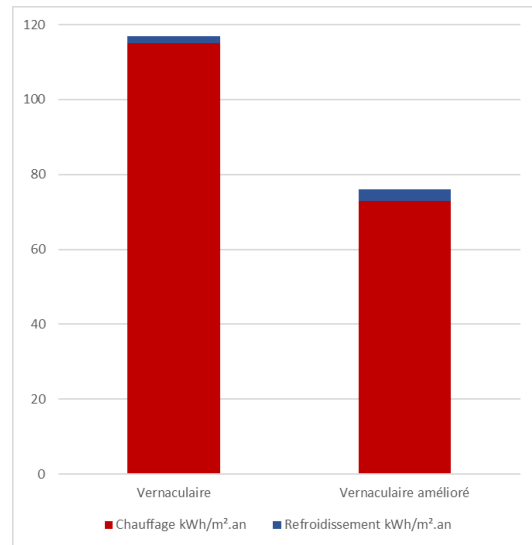


Figure 297 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement de la maison vernaculaire et de celle améliorée dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

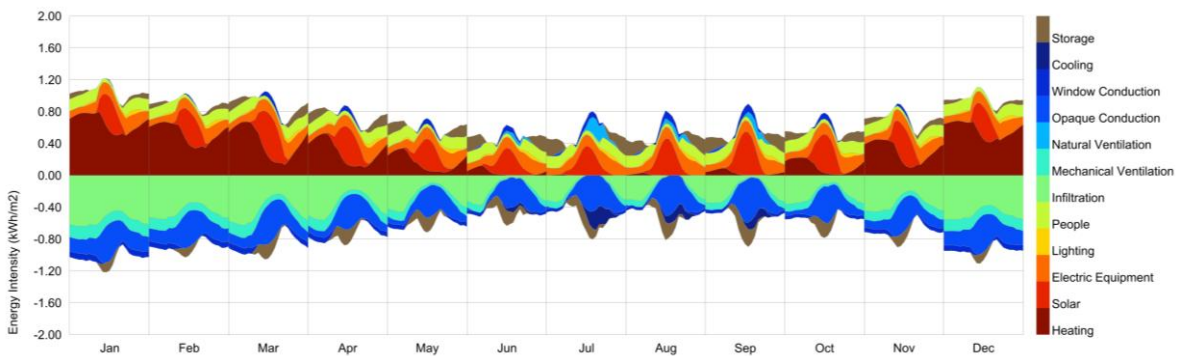


Figure 298 : Équilibre des charges thermiques de la maison vernaculaire améliorée dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

5.2.10.2_ Zone Sud-Est

Dans la zone Sud-Est, la maison vernaculaire est améliorée au niveau de la composition des parois ainsi que par l'ajout du brise-soleil au-dessus des ouvertures au sud. Au même titre que pour la zone Nord-Ouest, les parois verticales sont donc les mêmes pour la maison théorique en pierre de VPDG doublement isolée en béton de chanvre plus un enduit à la chaux. Le sol est en pierre de VPDG et les parois internes en plâtre.

Les résultats (Figure 300) montrent une forte diminution du besoin en chauffage, le besoin en refroidissement ne change pas. Le besoin estimé de chauffage diminue donc de 76 kWh/m².an à 41 kWh/m².an, tandis que le besoin estimé en refroidissement reste à 34 kWh/m².an. L'optimisation de la composition des différentes parois permet alors de réduire les besoins totaux mais ne permet pas de les réduire suffisamment. Dans cette zone, les déperditions en hiver étant moins importantes, une paroi en pierre plus isolée ne permet pas de suffisamment diminuer le besoin en chauffage et elle ne permet pas de diminuer le besoin en refroidissement.

Le besoin total en chauffage et refroidissement de la maison vernaculaire 'améliorée' s'élève alors à 75 kWh/m².an. Ce besoin est en effet plus élevé que la maison théorique donc le besoin total a été présenté précédemment et s'élevant à 47 kWh/m².an. De la même manière que pour la zone Nord-Ouest, dans la zone Sud-Est une optimisation au niveau de la paroi permet une diminution des besoins en chauffage et ici d'environ 45%. Néanmoins, la surchauffe n'est pas évitée et le besoin en refroidissement reste très élevé.

Cette simulation permet aussi de démontrer que l'optimisation de la paroi permet bel et bien d'optimiser la consommation liée au chauffage d'une maison en pierre, mais que la conception architecturale peut aussi avoir un fort impact.

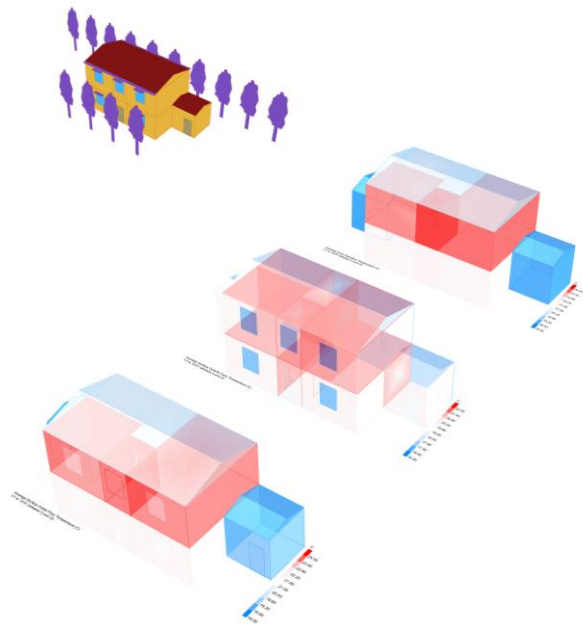


Figure 299 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur)

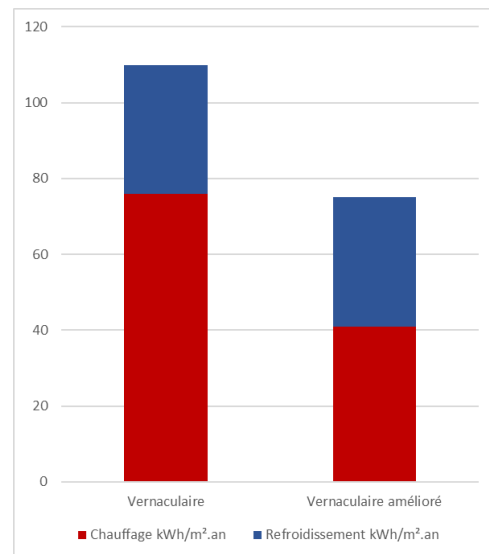


Figure 300 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement de la maison vernaculaire et de celle améliorée dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

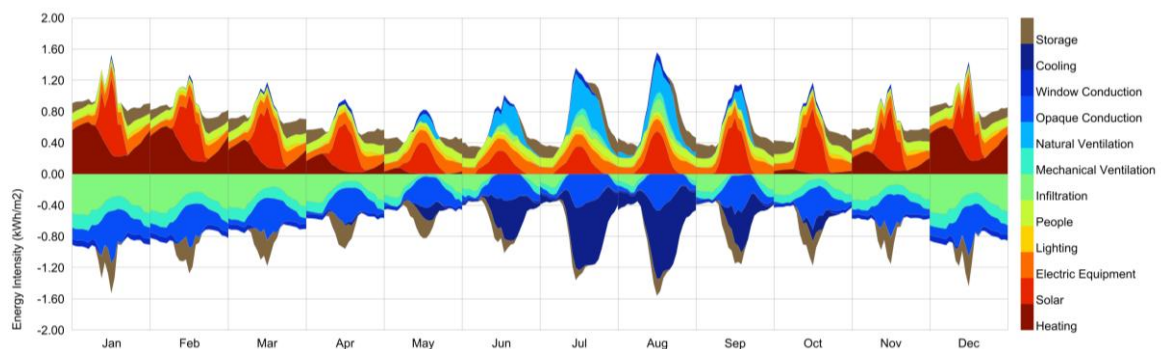


Figure 301 : Équilibre des charges thermiques de la maison vernaculaire améliorée dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

5.2.11_ Même maison dans l'autre zone

Cette simulation a pour but de mesurer l'impact du climat sur le besoin en chauffage et en refroidissement d'une maison. La maison théorique développée par les simulations pour minimiser les besoins dans sa zone sera placée dans le climat de l'autre zone.

5.2.11.1_ Zone Nord-Ouest

Cette simulation reprend la même maison que celle conservé dans la partie 5.2.9.1 (Figure 302) et la simulation est réalisée cette fois avec le climat de la ville de Marseille. Pour une comparaison complète, la maison théorie avec les parois en pierre de Saint-Vaast-Fine non isolée de 60cm sera aussi simulée avec le climat de la ville de Marseille.

Pour la maison avec les parois isolées en béton de chanvre à Marseille, le besoin en chauffage diminue, de 24 à 10 kWh/m².an et le besoin en refroidissement augmente fortement de 11 à 78 kWh/m².an (Figure 304). Le total des besoins s'élève à 88 kWh/m².an. Tandis que pour la maison avec les parois non isolées, les besoins sont légèrement plus importants, en chauffage et en refroidissement pour un total de 101 kWh/m².an.

Cette simulation montre bien qu'une maison optimisée thermiquement pour la zone Nord-Ouest, n'est pas du tout optimisée pour la zone Sud-Est.

La Figure 303 le montre bien avec l'ensemble des pièces étant en surchauffe, avec des températures de l'air très élevées, des températures de surface intérieur et extérieures aussi très élevées.

La Figure 305 montre bien que les apports solaires sont très importants et permettent néanmoins de presque faire disparaître le besoin en chauffage.



Figure 302 : Maison théorique finale pour la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

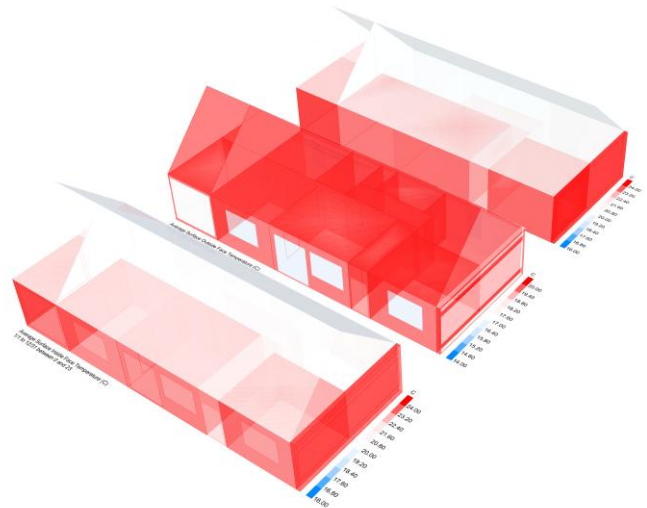


Figure 303 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur)

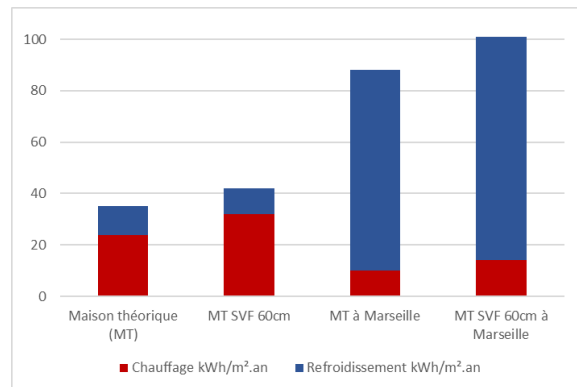


Figure 304 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement à Rennes et à Marseille (Source : Auteur)

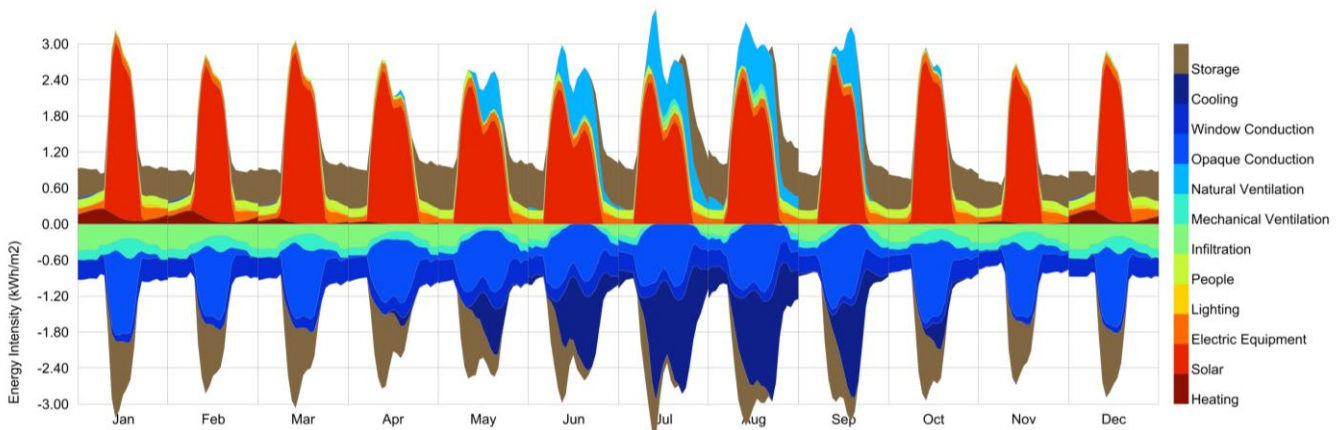


Figure 305 : Équilibre des charges thermiques de la maison théorique (n°50) de la zone Nord-Ouest à Marseille (Source : Auteur)

5.2.11.2_ Zone Sud-Est

Cette simulation reprend la même maison que celle conservé dans la partie 5.2.9.2 et la simulation est réalisée cette fois avec le climat de la ville de Rennes. Pour une comparaison complète, la maison théorie avec les parois en pierre de Vers-Pont-du-Gard non isolée de 60cm sera aussi simulée avec le climat de la ville de Rennes.

Pour la maison avec les parois isolées en béton de chanvre à Rennes, le besoin en chauffage augmente fortement, de 23 kWh/m².an à 41 kWh/m².an, tandis que le besoin en refroidissement diminue, de 24 kWh/m².an à 4 kWh/m².an (Figure 308). La même maison à Rennes, a donc un total des besoins estimé à 51 kWh/m².an. Ce qui est légèrement supérieur au total pour cette maison à Marseille, mais avec des besoins répartis différemment. Ceci démontre que la maison n'est pas entièrement optimisée pour le climat du Sud-Est de la France, et que la différence entre le nord et le sud de la France a tout de même un grand impact sur le besoin en chauffage.

Pour la maison avec la paroi en pierre de VPDG non isolée de 60cm, le besoin en chauffage devient nettement plus élevé, en passant de 47 à 67 kWh/m².an. Ces deux totaux sont tout de même plus élevés que pour la même maison à Marseille. Ceci montre bien que les besoins sont très différents et que les différentes compositions de la paroi en pierre ne permettent pas de contrer cette différence. La conception architecturale a le plus grand impact sur les besoins en chauffage et en refroidissement pour une maison en pierre.

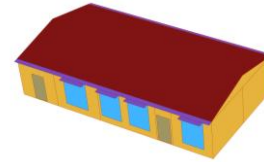


Figure 306 : Maison théorique finale pour la zone Sud-Est (Source : Auteur)

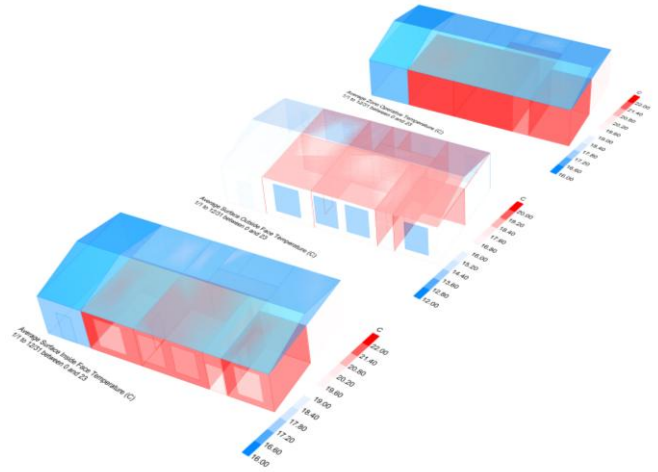


Figure 307 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur)

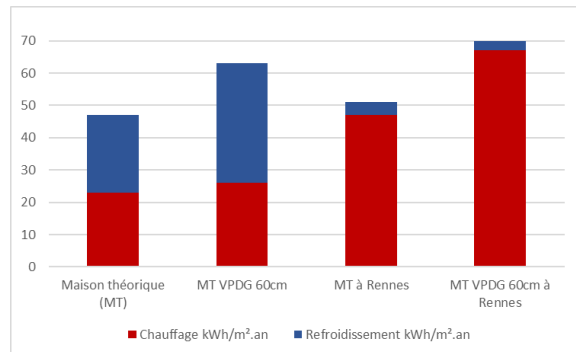


Figure 308 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement à Rennes et à Marseille (Source : Auteur)

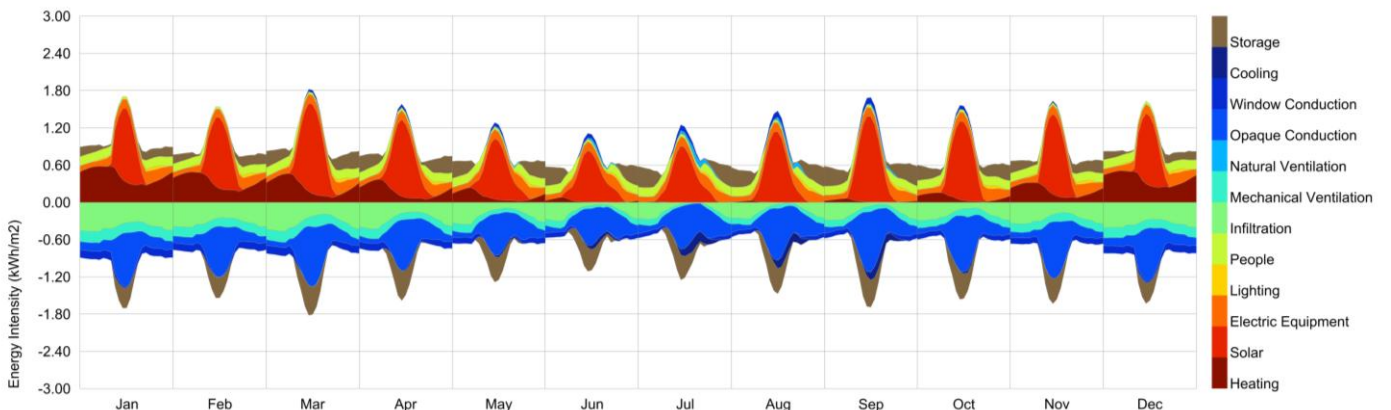


Figure 309 : Équilibre des charges thermiques de la maison théorique (n°54) de la zone Sud-Est à Rennes (Source : Auteur)

5.2.12_ Conclusion sur les échanges thermiques dans la maison en pierre naturelle

La présentation et l'analyse de l'ensemble des simulations à l'échelle de la maison a permis de comprendre les éléments impactant les échanges thermiques et donc les besoins en chauffage et refroidissements.

Dans un premier temps, l'analyse réalisée à partir de l'approche sol-air sur les différents ratios de volumes a permis de comprendre la relation entre le ratio et le bilan des échanges thermiques selon la période de l'année. En effet, l'approche sol-air induisant a permis de montrer que le ratio optimal dans un climat tempéré frais comme le Nord-Ouest de la France, est un ratio compact légèrement étiré face au Sud. La différence entre les ratios compacts étant faible. La différence entre avoir un et deux niveaux reste faible et surtout pour les ratios compacts. Bien que le ratio optimal soit difficile à définir, le ratio 2_1 permet de limiter les déperditions en été et d'éviter la surchauffe en été. Dans la zone Sud-Est, la différence entre les ratios est plus importante et tend fortement vers un ratio optimal entre le ratio 1.5_1 et le ratio 1_1. La différence entre un et deux niveaux est présente uniquement durant l'été, une maison à deux niveaux permet de limiter les apports en été. Le ratio optimal pour cette zone est le ratio 1_5, car il permet de plus limiter les apports en été. Les deux zones ont présenté des résultats fortement différents.

Dans un second temps, la première simulation thermique dynamique (STD) de la maison vernaculaire a permis de donner un ordre de grandeur des besoins en chauffage et refroidissement. La maison de la zone Nord-Ouest présente un important besoin en chauffage uniquement. La maison de la zone Sud-Est présente un besoin important en chauffage et un besoin deux fois inférieur en refroidissement. Dans la zone Nord-Ouest, la maison est idéale pour le confort d'été et dans la zone Sud-Est idéale pour la mi-saison.

Dans un troisième temps, une analyse entre les ratios de l'analyse sol-air avec les STD a permis de mieux comprendre l'impact du ratio sur les besoins. Dans les deux zones, la présence d'un étage induit des besoins bien plus importants. Cependant, la différence entre les ratios est presque inexistante, les ratios conservés sont donc ceux de l'analyse sol-air avec un seul niveau.

Dans un quatrième temps, l'analyse des différents ratios d'ouvertures par façade a permis de

démontrer que les ouvertures au Sud sont les plus importantes et permettent de fortement réduire le besoin en chauffage dans les deux zones. En revanche, lorsque le ratio dépasse 0,5, le besoin en refroidissement devient trop important. Les ouvertures au Nord doivent être faibles mais présente pour assurer une ventilation naturelle. Les ouvertures à l'Ouest et à l'Est ne permettent aucun gain thermique, la diminution du besoin en chauffage induit en général l'augmentation équivalente du besoin en refroidissement, et ce, dans les deux zones.

Dans un cinquième temps, l'analyse a porté sur les différentes parois verticales en pierre. Dans un premier temps, le choix de la pierre impact bien directement les besoins en chauffage et en refroidissement. Pour la zone Nord-Ouest, la pierre de Saint-Vaast-Fine définie comme étant la plus performante lors des premières expérimentations ne l'est plus, au dépend de la pierre de Tuffeau, et ce, parce que la STD utilisée ne prend pas en compte l'humidité, la résistance à l'humidité et la conductivité thermique lorsque la pierre est humide. Cette différence montre la limite de l'outil utilisé et l'importance de réaliser différentes analyses sans se fier à un unique résultat. L'analyse des différentes épaisseurs a permis de montrer que lorsque les besoins en chauffage et en refroidissement diminuent simultanément, ce paramètre étant le seul permettant de réaliser ceci de manière si significative. Enfin, l'analyse des différentes combinaisons a permis de confirmer que l'isolation par l'extérieur est plus efficace que l'isolation par l'intérieur, la différence étant toujours faible, et ce, dans les deux zones d'étude. L'isolation avec du béton de chanvre permet de compléter la pierre en l'isolant et en complétant aussi l'inertie de la paroi en stockant plus d'énergie. L'optimisation au niveau de la paroi permet une nette diminution du besoin en chauffage et en refroidissement.

Dans un sixième temps, l'analyse des différents types de sols utilisés permet de démontrer l'importance de cet élément dans les échanges thermiques à l'échelle de la maison. Certes, la différence est faible entre une pierre et une autre, mais un plancher isolé dans une maison en pierre induit une forte hausse du besoin en refroidissement, plus importante que la baisse du besoin en chauffage, induisant une hausse du besoin total. L'utilisation d'une pierre plus isolante permet de légèrement améliorer les performances de la maison. Une réflexion plus approfondie est nécessaire mettant en lien l'ensoleillement du sol, sa capacité à stocker de l'énergie et la température du sol durant l'année.

Dans un huitième temps, l'analyse de la maison avec des pièces implique le passage de la modélisation paramétrique de la maison théorique à une modélisation manuelle dans Rhino. Cette disposition spatiale induit pour les deux zones une augmentation des besoins en chauffage et en refroidissement. Ceci s'explique par la difficulté de stabilisation de la température entre les pièces, certaines se retrouvent alors surchauffées et d'autres pas assez. De plus, la ventilation naturelle est rendue plus complexe. L'analyse ne portant pas particulièrement sur la disposition spatiale, l'impact de cette dernière sur les besoins ne peut être exprimé. De plus, un traitement précis doit impliquer une différence entre les deux zones étudiées, car les besoins sont tout aussi différents.

Dans un neuvième temps, la modélisation des solutions passives telles que les espaces tampons et les protections solaires a permis de démontrer que de manière générale, elles permettent une forte diminution des besoins en chauffage et en refroidissement. Il a été observé un plus impact des solutions passives dans la zone Nord-Ouest car elles ont été mieux identifiées et implémentées. En effet, dans la zone Sud-Est, les solutions passives utilisées ont un plus faible impact, car il est plus difficile de modéliser des solutions passives liées au refroidissement saisonnier. La détermination des solutions passives adaptées, leurs adaptations au projet et leurs modélisations sont des éléments très complexes ne pouvant être démontrés de manière aussi simpliste. Néanmoins, une bonne modélisation et adaptation permettent de démontrer leurs impacts réels, comme le mur Trombe dans la zone Nord-Ouest. Les solutions passives liées au chauffage passif sont plus simples à implémenter et à modéliser, que les solutions passives liées au refroidissement, car ces dernières nécessitent une intégration parfaite des flux d'air, du vent et de l'humidité, ce qui n'est pas entièrement le cas de l'outil utilisé. De ce fait, la ventilation naturelle et l'intégration de la végétation nécessitent des études supplémentaires. Cependant, les solutions passives utilisées comme les espaces tampons montrent leurs forts impacts sur les besoins en chauffage et en refroidissement. Enfin, une paroi en pierre calcaire performante non isolée de 60cm et une conception architecturale adaptée à la zone climatique permet tout de même d'atteindre un faible taux de besoin en chauffage et refroidissement. Comparées aux maisons vernaculaires, dont les deux seules différences sont la conception architecturale et le choix d'une pierre calcaire légèrement plus performante, montre une forte différence.

Dans un dixième temps, l'analyse de la maison vernaculaire avec l'unique modification des parois utilisées pour le sol, les murs et les cloisons internes

démontre l'impact ce changement. En effet, une 'optimisation' au niveau de la paroi avec une isolation en béton de chanvre permet de montrer l'important impact sur les besoins en chauffage et en refroidissement qui diminuent fortement. Cependant, les besoins sont tout de même plus importants que pour la maison théorique modélisée à l'aide de l'optimisation des paramètres et des principes bioclimatiques. Ceci montrant donc que la conception architecturale est un levier tout autant important que l'optimisation à l'échelle de la paroi. Sachant que l'architecture vernaculaire présente déjà une certaine adaptation climatique non-négligeable.

Enfin, la dernière analyse a permis de réaliser l'importance de concevoir une maison en pierre en fonction du climat dans laquelle elle se situe. En effet, lorsque la maison conçue dans une zone est placée dans l'autre, les besoins totaux augmentent.

La Figure 311 et la Figure 312 présentent un récapitulatif des simulations et des résultats réalisés pour la zone Nord-Ouest. Cette partie a permis de confirmer les besoins présentés par le climat de cette zone. Le besoin en chauffage est prédominant et une optimisation du chauffage passif peut induire une légère surchauffe et donc un besoin en refroidissement. Cependant, la valeur utilisée pour le refroidissement (24°C) est bien en deçà des attendus selon la réglementation. Les solutions passives telles que le chauffage solaire passif avec des ouvertures au sud, une pierre isolée avec du béton de chanvre, des espaces tampons et un mur Trombe ont permis de fortement optimiser la performance thermique de la maison.

La Figure 310 et la Figure 313 présentent l'ensemble des simulations et des résultats pour la zone Sud-Est. Cette partie a permis de compléter la présentation faite initialement. Le besoin en refroidissement ne semblait pas être important, cependant, la forte température extérieure couplée au fort ensoleillement induit un besoin en refroidissement très important. A la suite des différentes solutions utilisées, ce besoin en refroidissement devient presque aussi important que le besoin en chauffage. Ce besoin en chauffage est bien moins important que dans la zone Nord-Ouest et est facilement réduit par les solutions passives telles que le chauffage solaire passif, une pierre isolée avec du béton de chanvre ou encore l'ajout d'un espace tampon. La diminution du besoin en refroidissement s'avère complexe et nécessite une prise en compte plus minutieuse. Les besoins en chauffage et refroidissement restent conséquents après optimisation, les températures limites étant plus strictes que la réglementation, 20°C pour le chauffage et 25°C pour le refroidissement.

Cette expérimentation sur les transferts thermiques de la maison en pierre a permis de révéler les éléments importants dans l'atteinte du confort hygrothermique. Ce confort hygrothermique, représenté par la diminution du besoin en chauffage et en refroidissement est dans un premier temps plus réduit au confort thermique. En effet, les STD réalisées dans Grasshopper à l'aide de Ladybug Tools et d'EnergyPlus, ne permettent pas de prendre correctement l'impact de l'humidité sur les transferts thermiques.

La paroi est alors un paramètre très important et son optimisation avec du béton de chanvre permet de fortement réduire les besoins sans perdre les avantages d'une paroi en pierre. Le béton de chanvre est plus efficace placé à l'extérieur. Néanmoins, l'optimisation de la paroi ne permet pas une amélioration suffisante de la performance thermique de la maison en pierre. La conception architecturale représentée par la forme, les solutions passives, les ouvertes, etc, permet une nette amélioration des performances thermiques.

La conception architecturale doit être située et en lien avec le climat local, et ce, même selon les différentes régions françaises.

Par ailleurs, les températures limites pour le chauffage et le refroidissement impactent la lecture des résultats. Ces dernières étant définies par zones, 19°C et 24°C pour la zone Nord-Ouest et 20°C et 25°C pour la zone Sud-Est. La réglementation énergétique utilise aujourd'hui 19°C comme limite de température pour le chauffage et 28°C pour le refroidissement. Le 28°C diminue à 26°C durant la nuit. Les besoins en chauffage et en refroidissement peuvent alors fortement diminuer avec l'adaptation à ces valeurs. Le total de ces besoins fait référence au besoin bioclimatique mentionné dans la RE2020.

La conception d'une maison en pierre est complexe et nécessite l'utilisation des méthodes de conception bioclimatiques, incluant notamment les solutions passives. L'utilisation des STD paramétriques dans le processus de conception comme présenté dans cette partie peut être un outil puissant pour assurer l'atteinte du confort hygrothermique d'une maison en pierre. Les résultats montrent qu'il semble même possible d'atteindre le confort thermique dans le Nord de la France avec une maison en pierre avec un besoin bioclimatique inférieur à 50 kWh/m².an. Cette analyse à l'échelle de la maison permet de réaliser qu'il n'est pas plus compliqué d'atteindre ce confort dans le Nord de la France que dans le Sud de la France, sans compter la différence entre les objectifs présentés par la réglementation.

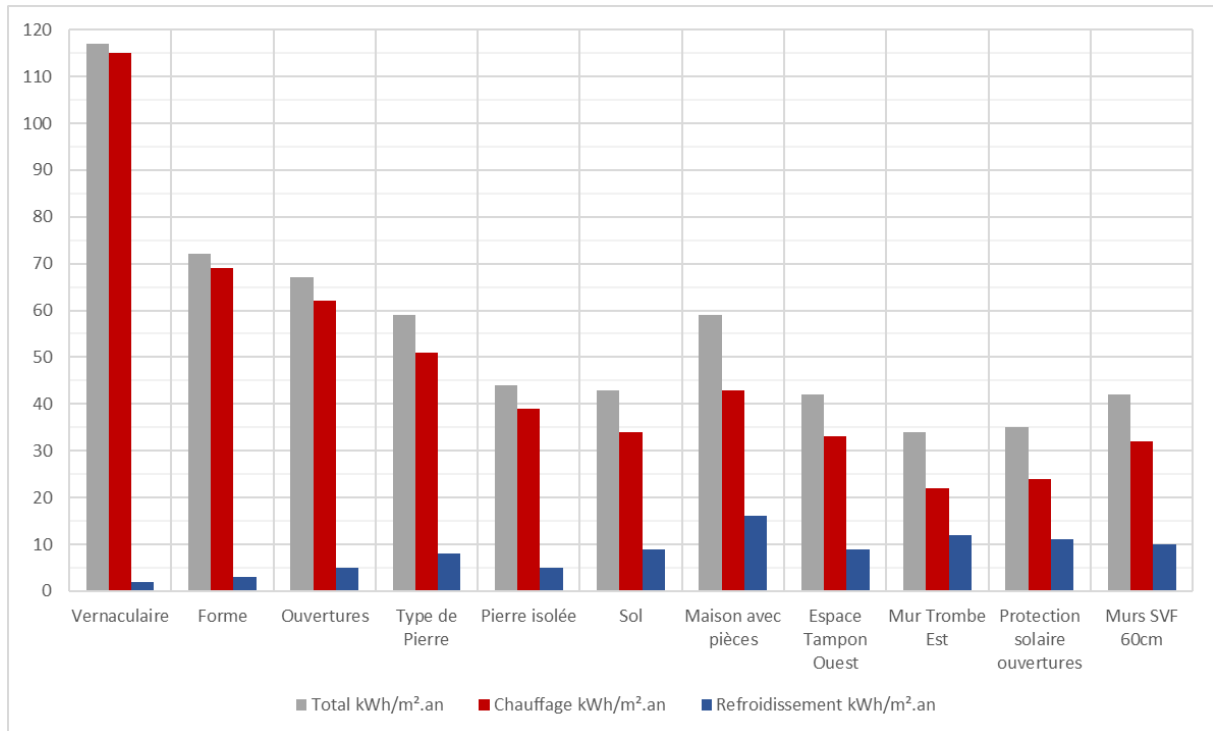


Figure 311 : Tableau récapitulatif des résultats de toutes les solutions conservées dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

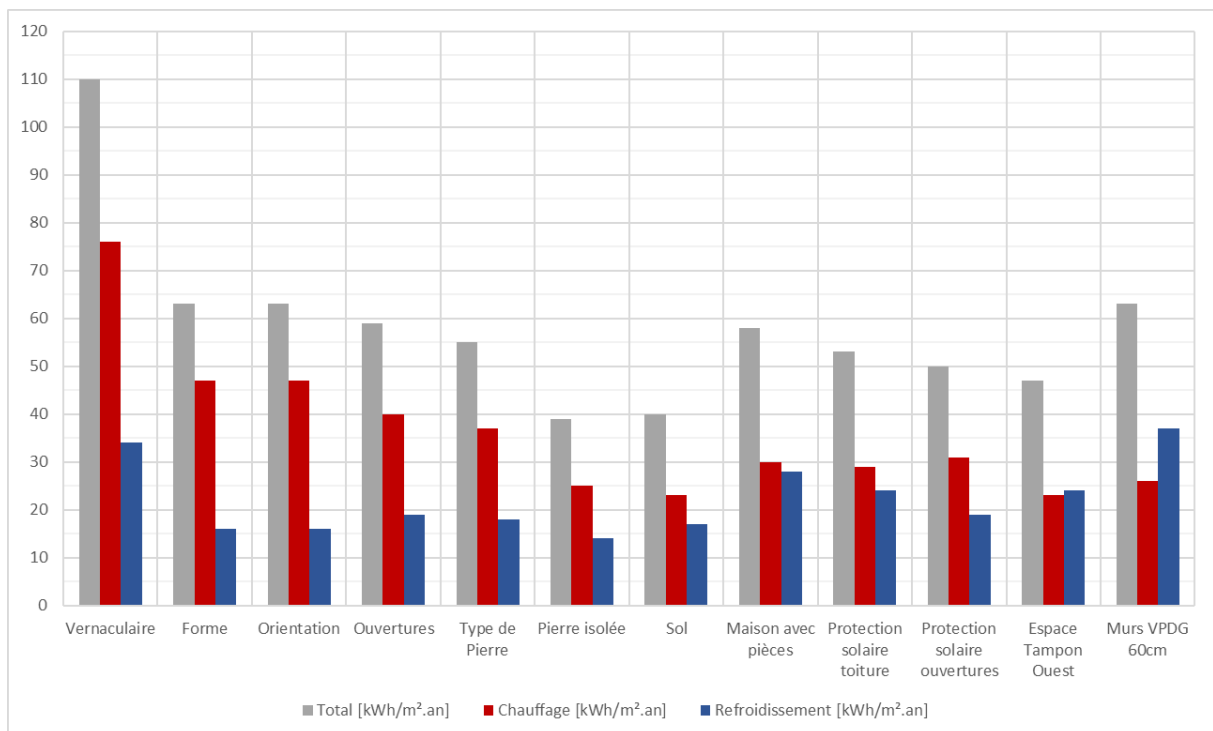


Figure 310 : Tableau récapitulatif des résultats de toutes les solutions conservées dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

n°	Type de simulation	Étages	Ratio	Surface habitable	Ratio ouverture				Paroi	Sol	Paroi interne	Protection solaire fenêtres	Besoin estimé en [kWh/m².an]		
					Ratio Sud	Ratio Nord	Ratio Ouest	Ratio Est					Chauffage	Refroidissement	Total
1	1_Vernaculaire	1	3_1	72	0,1	0,01	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	Calcaire T 10cm	x	115	2	117
2	2_Sol-air	1	2_1	100	0,3	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	69	3	72
3		1	1.5_1	100	0,3	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	68	3	71
4		1	1_1	100	0,3	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	70	2	72
5		2	2_1	100	0,3	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	93	11	104
6		2	1.5_1	100	0,3	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	92	10	102
7		2	1_1	100	0,3	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	95	8	103
8	3_Ouverture_Sud	1	2_1	100	0,1	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	83	1	84
9		1	2_1	100	0,2	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	76	2	78
10		1	2_1	100	0,3	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	69	3	72
11		1	2_1	100	0,4	0,03	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	63	7	70
12	3_Ouverture_Nord	1	2_1	100	0,4	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	63	11	74
13		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	62	5	67
14		1	2_1	100	0,4	0,2	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	61	5	66
15		1	2_1	100	0,4	0,3	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	60	6	66
16	3_Ouverture_Ouest	1	2_1	100	0,4	0,1	0,05	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	62	7	69
17		1	2_1	100	0,4	0,1	0,1	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	61	5	66
18		1	2_1	100	0,4	0,1	0,2	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	60	6	66
19	3_Ouverture_Est	1	2_1	100	0,4	0,1	0	0,05	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	61	7	68
20		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0,1	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	61	5	66
21		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0,2	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	59	6	65
22	4_Type de Pierre	1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	Noyant 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	57	5	62
23		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	Tuffeau 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	50	6	56
24		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	SVF 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	51	8	59
25	4_Épaisseur et combinaison Paroi verticale en Pierre	1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	SVF 50cm	Calcaire T 30cm	x	x	55	11	66
26		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	SVF 40cm	Calcaire T 30cm	x	x	61	12	73
27		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	SVF 80cm	Calcaire T 30cm	x	x	45	5	50
28		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	SVF+BC - ITE : 10/40	Calcaire T 30cm	x	x	42	5	47
29		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	SVF + BC - ITI : 40/10	Calcaire T 30cm	x	x	44	6	50
30		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	Double iso : 5/40/5	Calcaire T 30cm	x	x	44	6	50
31		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	Double iso (Int.) : 5/40/10	Calcaire T 30cm	x	x	40	9	49
32		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	Double iso (Ext.) : 10/40/5	Calcaire T 30cm	x	x	40	6	46
33		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	Calcaire T 30cm	x	x	39	5	44
34		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	Mur double E : 30/10/10	Calcaire T 30cm	x	x	43	5	48
35		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	Mur double I : 10/10/30	Calcaire T 30cm	x	x	43	5	48
36	5_Sol et sous-sol	1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	x	x	34	9	43
37		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 40cm	x	x	32	11	43
38		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	Béton isolé	x	x	30	14	44
39		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	Bois isolé + VS	x	x	26	24	50
40	6_Protection solaire ouvertures	1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	x	0,05	35	11	46
41		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	x	0,1	36	11	47
42		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	x	0,2	38	6	44
43		1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	x	0,3	40	5	45
44	7_Pièces	1	2_1	100	0,4	0,1	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	Plâtre 12cm	x	43	16	59
45	8_Espaces tampons Ouest	1	2_1	100	0,4	0,1	0,4	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	Plâtre 12cm	x	33	9	42
46	8_Mur Trombe Est	1	2_1	100	0,4	0,1	0,4	0,8	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	Plâtre 12cm	x	22	12	34
47	8_Cloisons internes	1	2_1	100	0,4	0,1	0,4	0,8	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	SVF 10cm	x	20	20	40
48		1	2_1	100	0,4	0,1	0,4	0,8	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	SVF 20cm	x	20	14	34
49		1	2_1	100	0,4	0,1	0,4	0,8	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	SVF 30cm	x	21	13	34
50	8_Protection solaire fenêtres	1	2_1	100	0,4	0,1	0,4	0,8	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	Plâtre 12cm	30cm au sud	24	11	35
51	8_Murs non isolés 60cm	1	2_1	100	0,4	0,1	0,4	0,8	SVF 60cm	SVF 30cm	Plâtre 12cm	30cm au sud	32	10	42
52	9_Vernaculaire amélioré	1	3_1	72	0,1	0,01	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	Plâtre 12cm	x	73	3	76
53	10_N°50 à Marseille	1	2_1	100	0,4	0,1	0,4	0,8	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	SVF 30cm	Plâtre 12cm	30cm au sud	10	78	88
54	10_N°51 à Marseille	1	2_1	100	0,4	0,1	0,4	0,8	SVF 60cm	SVF 30cm	Plâtre 12cm	30cm au sud	14	87	101

Figure 312 : Tableau récapitulatif des paramètres et résultats de toutes les STD réalisées dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

n°	Type de simulation	Étages	Ratio	Surface habitable	Ratio ouverture				Orientation par rapport au Sud	Paroi	Sol	Paroi interne	Protection solaire fenêtres	Arbres	Besoin estimé en [kWh/m².an]			
					Ratio Sud	Ratio Nord	Ratio Ouest	Ratio Est							Chauffage	Refroidissement	Total	
1	1_Vernaculaire	2	1.5_1	108	0,2	0,05	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	Calcaire T 20cm	x	Oui	76	34	110	
2	2_Sol-air	1	2_1	100	0,3	0,03	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	46	17	63	
3		1	1.5_1	100	0,3	0,03	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	47	16	63	
4		1	1_1	100	0,3	0,03	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	50	14	64	
5		1	1.1.5	100	0,3	0,03	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	55	14	69	
6		2	2_1	100	0,3	0,03	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	54	47	101	
7		2	1.5_1	100	0,3	0,03	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	56	50	106	
8		2	1_1	100	0,3	0,03	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	61	40	101	
9		2	1.1.5	100	0,3	0,03	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	69	40	109	
10	3_Orientation	1	1.5_1	100	0,3	0,03	0	0	-12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	48	16	64	
11		1	1.5_1	100	0,3	0,03	0	0	0	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	47	16	63	
12		1	1.5_1	100	0,3	0,03	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	47	16	63	
13		1	1.5_1	100	0,3	0,03	0	0	25	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	48	17	65	
14	4_Ouverture_Sud	1	1.5_1	100	0,1	0,03	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	63	11	74	
15		1	1.5_1	100	0,2	0,03	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	54	14	68	
16		1	1.5_1	100	0,3	0,03	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	47	16	63	
17		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	40	19	59	
18		1	1.5_1	100	0,5	0,03	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	35	21	56	
19	4_Ouverture_Nord	1	1.5_1	100	0,4	0	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	40	18	58	
20		1	1.5_1	100	0,4	0,1	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	40	19	59	
21		1	1.5_1	100	0,4	0,2	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	39	20	59	
22		1	1.5_1	100	0,4	0,3	0	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	39	21	60	
23	4_Ouverture_Ouest	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0,05	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	39	19	58	
24		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0,1	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	38	20	58	
25		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0,2	0	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	37	22	59	
26	4_Ouverture_Est	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0,05	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	39	19	58	
27		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0,1	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	39	20	59	
28		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0,2	12	Calcaire T 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	37	22	59	
29	5_Type de pierre	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	Beaulieu 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	39	18	57	
30		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	VPDG 60cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	37	18	55	
31	5_Paroi verticale en pierre	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	VPDG 50cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	40	19	59	
32		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	VPDG 40cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	45	20	65	
33		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	VPDG 80cm	Calcaire T 30cm	x	x	x	32	16	48	
34		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	ITE : 10/40	Calcaire T 30cm	x	x	x	27	15	42	
35		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	ITI : 40/10	Calcaire T 30cm	x	x	x	29	16	45	
36		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	Double iso : 5/40/5	Calcaire T 30cm	x	x	x	29	15	44	
37		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	Double iso (int) : 5/40/10	Calcaire T 30cm	x	x	x	26	17	43	
38		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	Double iso (ext) : 10/40/5	Calcaire T 30cm	x	x	x	26	14	40	
39		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	Calcaire T 30cm	x	x	x	25	14	39	
40		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	Mur double E : 30/10/10	Calcaire T 30cm	x	x	x	27	16	43	
41		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	Mur double I : 30/10/30	Calcaire T 30cm	x	x	x	27	15	42	
42	6_Sol et sous-sol	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 20cm	x	x	x	29	22	51	
43		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	x	x	x	23	17	40	
44		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 40cm	x	x	x	19	24	43	
45		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	Béton isolé	x	x	x	14	38	52	
46		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	Bois isolé + VS	x	x	x	11	57	68	
47		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	x	x	x	30	28	58
48	8_Protection solaire toiture	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	x	x	x	29	24	53
49	8_Protection solaire ouvertures au Sud	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	20cm Sud	x	x	30	21	51
50		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	30cm Sud	x	x	31	20	51
51		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	40cm Sud	x	x	31	19	50
52		1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	50cm Sud	x	x	31	19	50
53	8_Pergola	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	40cm Sud	x	x	35	21	56
54	9_Espace Tampon Ouest	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	40cm Sud	x	x	23	24	47
55	9_Cloisons internes	1	1.5_1	100	0,5	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	VPDG 10cm	40cm Sud	x	x	22	27	49
56		1	1.5_1	100	0,5	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	VPDG 20cm	40cm Sud	x	x	22	32	54
57		1	1.5_1	100	0,5	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	VPDG 30cm	40cm Sud	x	x	23	29	52
58		9_Végétation	1	1.5_1	100	0,5	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	40cm Sud	Oui	x	32	18
59	9_Murs non isolés 60cm	1	1.5_1	100	0,5	0,03	0	0	12	VPDG 60cm	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	40cm Sud	x	x	26	37	63
60	10_Vernaculaire amélioré	2	1.5_1	108	0,2	0,05	0	0	0	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	40cm Sud	Oui	41	34	75	
61	11_N°54 à Rennes	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	2,5/10/40/5/2,5 (chaux)	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	40cm Sud	Oui	47	4	51	
62	11_N°59 à Rennes	1	1.5_1	100	0,4	0,03	0	0	12	VPDG 60cm	VPDG 30cm	Plâtre 12cm	40cm Sud	Oui	67	3	70	

Figure 313 : Tableau récapitulatif des paramètres et résultats de toutes les STD réalisées dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

Conclusion générale

Afin de conclure, un rappel de la problématique et des hypothèses énoncées en début de cette recherche est primordial.

L'introduction à ce sujet a permis de mettre en évidence le fait que les méthodes de conception architecturale ont toujours évolué en lien étroit avec les matériaux et les outils disponibles à chaque époque. Si les avancées technologiques du XX^e siècle ont progressivement éloigné l'architecture des savoir-faire constructifs traditionnels, les enjeux environnementaux actuels invitent à en réinterroger les fondements. L'architecture vernaculaire et l'usage de matériaux naturels, tels que la pierre, apparaissent ainsi comme des ressources pertinentes, dont les principes peuvent aujourd'hui être analysés et valorisés à l'aide des outils numériques contemporains.

La problématique posée dans le cadre de cette recherche était donc la suivante :

Comment optimiser le confort hygrothermique lors de la conception d'une maison en pierre naturelle dans un climat tempéré à l'aide de méthodes de conception bioclimatique et de simulations énergétiques ?

L'hypothèse principale de réponse à la problématique était la suivante :

Le confort thermique d'un bâtiment en pierre dans un climat tempéré peut être significativement amélioré par une conception bioclimatique à plusieurs échelles (site, bâtiment, paroi), sans recours à des systèmes actifs en intégrant les simulations énergétiques dans le processus de conception architectural.

De cette hypothèse générale, trois sous-domaines présentent des hypothèses plus précises :

À l'échelle du site :

Les hypothèses formulées soulignent l'importance de l'implantation du bâtiment en fonction du climat. Dans les régions froides et tempérées, une orientation principale vers le sud permet de maximiser les apports solaires passifs et d'améliorer le confort thermique, tandis que dans les régions plus chaudes, une orientation privilégiant le nord contribue à limiter les surchauffes estivales. La prise en compte des vents dominants, par l'implantation ou la morphologie du bâtiment, apparaît également comme un levier essentiel pour réduire les pertes thermiques.

À l'échelle du bâtiment :

La forme architecturale et la gestion des ouvertures constituent des paramètres déterminants de la

performance énergétique. Une volumétrie compacte, adaptée au contexte climatique, permet de limiter les surfaces d'échange thermique, tandis qu'un dimensionnement et une orientation maîtrisés des ouvertures favorisent les apports solaires en hiver tout en limitant les déperditions. L'adaptation de l'orientation ou de l'inclinaison des parois en fonction de l'angle solaire saisonnier est également envisagée comme un moyen d'optimiser les gains thermiques passifs.

À l'échelle de la paroi :

L'épaisseur et la composition des murs en pierre jouent un rôle central dans la régulation hygrothermique. L'augmentation de l'épaisseur améliore l'inertie thermique et le déphasage, contribuant à une meilleure stabilité des températures intérieures. L'ajout d'une isolation extérieure, en conservant la pierre apparente côté intérieur, permet de concilier inertie et performance thermique, tandis que la mise en œuvre d'un double mur en pierre séparé par une lame d'air constitue une piste pour limiter la transmission directe des flux thermiques.

Ce mémoire s'est donc attaché à interroger la pertinence de la pierre naturelle comme matériau de construction capable de répondre aux exigences contemporaines de confort hygrothermique et de performance énergétique dans un climat tempéré. Longtemps associée à une architecture vernaculaire ou patrimoniale, la pierre est aujourd'hui fréquemment remise en question au regard des réglementations thermiques actuelles. L'hypothèse centrale de ce travail postulait toutefois que cette lecture partielle occulte des qualités fondamentales du matériau, et que son efficacité ne peut être évaluée indépendamment du processus de conception architecturale dans lequel elle s'inscrit.

L'approche développée a reposé sur une analyse à plusieurs échelles, articulée autour de trois niveaux interdépendants : le site et le climat, la forme bâtie, et la paroi. L'étude de l'architecture vernaculaire française a permis de mettre en évidence des stratégies de conception empiriques, élaborées en réponse directe aux conditions climatiques locales. L'orientation des bâtiments, la protection vis-à-vis des vents dominants, la compacité des volumes ou encore la gestion fine des ouvertures apparaissent comme des dispositifs bioclimatiques cohérents, dont l'efficacité repose sur leur articulation plutôt que sur leur application isolée. Ces principes, loin de constituer des solutions figées ou obsolètes, trouvent une résonance particulière lorsqu'ils sont réinterprétés à l'aide des outils de simulation énergétique contemporains.

À l'échelle du site, les hypothèses formulées ont globalement pu être confirmées. Les simulations ont montré que l'orientation principale du bâtiment et de ses ouvertures constitue un levier déterminant pour les bâtiments en pierre, particulièrement sensibles aux apports solaires et aux pertes thermiques. Dans les climats tempérés, comme dans le nord de la France, une orientation principale au sud permet d'optimiser les gains solaires passifs en hiver (et en mi-saison) et d'améliorer significativement le confort thermique intérieur. Dans des climats tempérés plus chauds, comme dans le sud de la France, la limitation des apports solaires directs et la protection contre les surchauffes estivales apparaissent comme des enjeux prioritaires, bien que l'orientation sud demeure nécessaire pour assurer un chauffage passif en hiver. La prise en compte des vents dominants, tant dans l'implantation que dans la morphologie du bâti, s'est en revanche révélée peu pertinente, dans la mesure où aucune simulation de flux d'air n'a été réalisée. Lors des simulations STD pour le sud de la France, l'orientation en fonction du vent ne s'est ainsi pas avérée significativement intéressante.

Les expérimentations menées à l'échelle de la paroi ont mis en évidence que la pierre présente un comportement hygrothermique particulièrement intéressant, notamment grâce à sa capacité à amortir les variations de température et d'humidité extérieures. Grâce à son inertie thermique élevée et à son déphasage thermique, la pierre permet de lisser les fluctuations thermiques et de produire une température de surface intérieure plus stable dans le temps. Toutefois, une paroi en pierre non isolée, même de forte épaisseur, demeure insuffisante pour garantir durablement un niveau de confort satisfaisant, en particulier durant la période hivernale. Un mur en pierre non isolé est favorable au confort d'été, mais induit des déperditions hivernales trop importantes pour être optimal sur l'ensemble de l'année.

L'ajout d'une isolation en béton de chanvre permet alors de compléter efficacement ces propriétés, en améliorant la résistance thermique de la paroi tout en conservant les bénéfices liés à l'inertie, au déphasage et à la régulation hygrométrique de la pierre. Une paroi en pierre d'une épaisseur de 40 cm, isolée par au moins 10 cm de béton de chanvre, permet d'assurer un confort minimal, tant en termes de température de paroi intérieure que de besoins de chauffage induits. Cela reste toutefois conditionné à une conception architecturale optimisée. L'isolation par l'extérieur se révèle légèrement plus efficace, bien que la différence soit faible lorsque la pierre est isolée avec du béton de chanvre. Les combinaisons intégrant des cavités d'air présentent des avantages thermiques

importants, mais nécessitent une attention particulière en raison des risques de condensation. D'un point de vue thermique, un mur double en pierre rempli de béton de chanvre s'avère également très performant.

Néanmoins, l'étude à l'échelle de la paroi a montré ses limites lorsqu'elle est considérée de manière isolée. Les performances hygrothermiques d'une paroi en pierre ne peuvent être pleinement comprises sans être replacées dans une simulation énergétique ou thermique globale. C'est pourquoi des simulations à l'échelle de la maison se sont révélées indispensables pour évaluer les besoins énergétiques réels et la cohérence d'ensemble du projet.

À l'échelle du bâtiment, les simulations thermiques dynamiques ont confirmé que la conception architecturale constitue un levier majeur d'optimisation énergétique passive. La forme bâtie, la compacité, l'orientation des volumes, la distribution des espaces et la gestion des ouvertures exercent une influence déterminante sur les besoins énergétiques globaux, souvent supérieure à celle induite par la seule composition de la paroi. Si l'optimisation de la paroi en pierre permet de réduire les déperditions thermiques, elle ne saurait compenser une conception architecturale inadaptée. La pierre apparaît ainsi non pas comme un frein à la performance énergétique, mais comme un matériau exigeant, imposant une rigueur accrue dans le processus de conception afin de répondre aux exigences thermiques contemporaines. Par ailleurs, les solutions passives, lorsqu'elles sont adaptées aux spécificités climatiques, s'avèrent particulièrement efficaces pour atteindre un confort hygrothermique satisfaisant dans une maison en pierre.

Ces résultats permettent de répondre à la problématique initiale de ce mémoire. Le confort hygrothermique d'une maison en pierre naturelle dans un climat tempéré peut être significativement optimisé sans recours systématique à des systèmes actifs, à condition que la conception bioclimatique soit intégrée de manière cohérente à toutes les échelles du projet, et que les simulations énergétiques soient mobilisées en amont comme outils d'aide à la décision. Loin de se substituer à l'intuition architecturale, ces outils permettent d'objectiver des phénomènes physiques complexes et de réconcilier savoir-faire traditionnels et exigences réglementaires actuelles.

Cette recherche m'amène à présenter une méthode de conception, s'alignant à la méthodologie d'analyse de ce mémoire, adaptée dans le but d'atteindre un objectif de confort pour une maison en pierre naturelle en France. La Figure 314 présente cette méthode de conception. La conception commence par un site, qui possède son propre climat et ses propres ressources (types de pierres et autres matériaux). A proximité du site, une architecture vernaculaire existe et a été réalisée pour répondre au même climat et la plupart du temps avec les ressources disponibles. Il convient donc d'étudier l'architecture vernaculaire pour en tirer des concepts, modèles et théories afin d'en généraliser des principes de conception. Ces principes sont souvent représentés par les principes de conception bioclimatiques, il convient donc de les combiner. Ensuite, s'ensuit le processus de conception architectural qui est représenté par 4 domaines principaux (dans le but de réaliser un projet bioclimatique) :

- Forme
- Construction
- Solution passive
- Conception Architecturale

Bien que ce mémoire à présenté une étude simplifiée pour chacun de ces domaines au travers des expérimentations, il est primordial de les développer en même temps et de faire des allers et retours tout au long du processus de conception. Cette méthode de conception permettra alors d'assurer le confort hygrothermique.

Certaines limites doivent toutefois être soulignées. Les résultats obtenus dans ce mémoire reposent sur des modèles numériques qui, bien que précis, demeurent des représentations simplifiées de la réalité construite et ne peuvent être transposés tels quels. Ils nécessitent systématiquement une adaptation au contexte spécifique de chaque projet afin d'en garantir la pertinence.

En définitive, ce mémoire invite à repenser une réévaluation du rôle de la pierre dans l'architecture contemporaine, non comme un matériau du passé à adapter aux normes actuelles, mais comme un support de réflexion capable de transformer en profondeur les méthodes de conception. En réaffirmant l'importance de l'architecture comme discipline de synthèse, située à l'interface entre climat, matière et usage, ce travail contribue à ouvrir des perspectives pour une pratique plus située, plus sobre et plus attentive aux ressources locales, dans un contexte de transition environnementale encore contemporain.

Ce travail n'est évidemment pas complet et ne saurait ni résumer ni assurer la pertinence de la pierre comme matériau de construction dans un climat tempéré comme la France.

La définition climatique peut sembler anodine dans un pays comme la France et ce même à travers les différentes régions. Néanmoins, bien que non présenté dans ce mémoire, le changement climatique induit une évolution du climat et de manière non égale sur l'ensemble du territoire français. Une des prédictions réalisées par Köppen-Geiger présente une version climatique de la France bien différente de celle que l'on connaît aujourd'hui. En 2100, le climat méditerranéen (de la zone Sud-Est) pourrait se retrouver sur toute la côte Ouest de la France, et ce, jusqu'à la zone Nord-Ouest étudiée dans ce mémoire. Cette possibilité évoque alors l'adaptabilité de l'architecture, des processus de conception des architectes et enfin des solutions de construction en pierre en France. Si le climat tend à se réchauffer, la pierre est-elle encore plus pertinente à utiliser comme matériau de construction ?

Cette possibilité montre l'urgence et l'importance d'adapter la conception architecturale vers une architecture bioclimatique. Les outils numériques pouvant accompagner les architectes dans cette démarche.

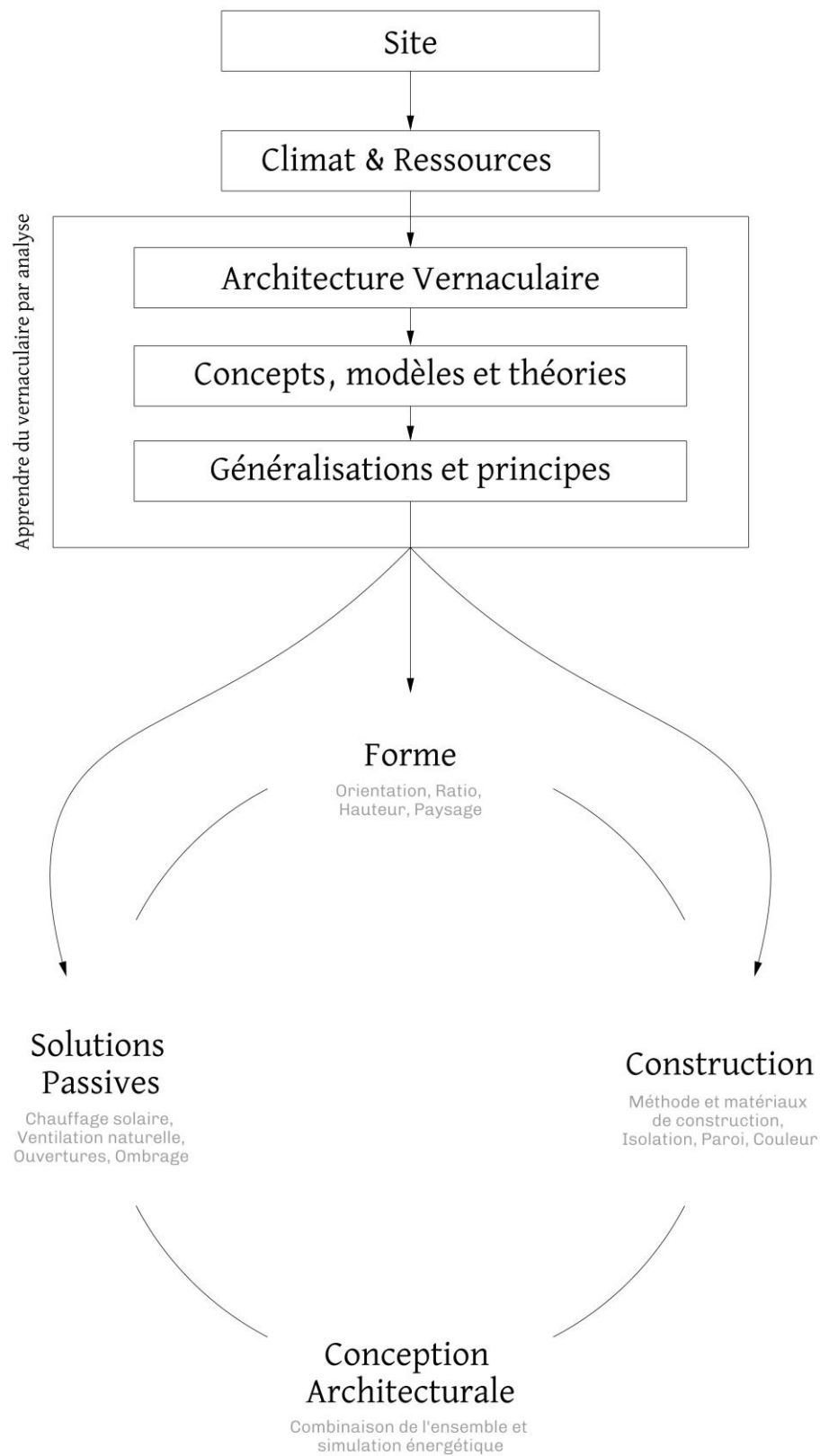


Figure 314 : Méthode de conception adaptée aux méthodes de conception bioclimatiques (Source : Auteur)

Bibliographie

- AMOS RAPOPORT, 1996. *Pour Une Anthropologie De La Maison*. Disponible à l'adresse : <http://archive.org/details/pour-une-anthropologie-de-la-maison>
- ANTRETTETTER, Florian, SAUER, Fabian et HOLM, Teresa Schöpfer and Andreas, 2011. Validation of a hygrothermal whole building simulation software. 27 juin 2011. Disponible à l'adresse : <https://www.aivc.org/resource/validation-hygrothermal-whole-building-simulation-software>
- ASQUITH, Lindsay et VELLINGA, Marcel, 2006. *Vernacular Architecture in the 21st Century: Theory, Education and Practice*. Taylor & Francis. ISBN 978-1-134-32554-2.
- BERTHIER, Stéphane, 2022. Le renouveau de l'architecture en pierre. *d'architectures*. février 2022. Vol. n°296. Disponible à l'adresse : <https://www.darchitectures.com/le-renouveau-de-larchitecture-en-pierre-a5787.html>
- BORNE, Emmanuelle et FONTÈS, François, 2017. Construire en pierre. *L'Architecture d'aujourd'hui*. mars 2017. Vol. n°417. Disponible à l'adresse : <https://www.larchitecturedaujourd'hui.fr/somme-aa-417/>
- BRGM, 2014. *Mémento sur l'industrie française des roches ornementales & de construction*. Disponible à l'adresse : <https://www.mineralinfo.fr/fr/actualite/actualite/roches-ornementales-de-construction-brgm-publie-un-memento-presentant-letat-des>
- CAÑAS, Ignacio et MARTÍN, Silvia, 2004. Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture. *Building and Environment*. 1 décembre 2004. Vol. 39, n° 12, pp. 1477-1495. DOI [10.1016/j.buildenv.2004.04.007](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.007).
- CÉRÉZO, Véronique, 2005. *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. thèse. Lyon, France : INSA. Disponible à l'adresse : <https://theses.fr/2005ISAL0037>
- CHALUMEAU, Régis, 2010. *L'éco-construction, une nécessité et une opportunité pour l'habitat et le secteur du bâtiment en Basse-Normandie*. décembre 2010. Conseil Économique, Social et Environnemental Régional de Basse-Normandie.
- COJOCARU, Alexandra et ISOPESCU, Dorina, 2021. Passive Strategies of Vernacular Architecture for Energy Efficiency. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section*. 1 juin 2021. Vol. 67, pp. 33-44. DOI [10.2478/bipca-2021-0013](https://doi.org/10.2478/bipca-2021-0013).
- COURGEY, Samuel et OLIVA, Jean-Pierre, 2008. La conception bioclimatique, des maisons confortables et économes. *Terre Vivante*. ISBN 978-2-914717-21-2.
- CTMNC, 2022. Blog de pierre : Lettre d'information du Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction. juillet 2022. Vol. n°22, pp. 16.
- CTMNC, 2023. Blog de pierre : Lettre d'information du Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction. juillet 2023. Vol. n°23, pp. 16.
- DAHL, Torben, TIND KRISTENSEN, Eva, FRIIS MØLLER, Winnie, ROTNE, Georg, SØRENSEN, Peter, ALBJERG, Nanna, KROGSBÆK MATHIASSEN, Nanet, VOLTELEN, Nina et WEDEBRUNN, Ola, 2010. *Climate and architecture*. London, New York : Routledge. ISBN 978-0-415-56308-6.
- DEFO, Maurice, LACASSE, Michael et LAOUADI, Abdelaziz, 2022. A comparison of hygrothermal simulation results derived from four simulation tools. *Journal of Building Physics*. 1 janvier 2022. Vol. 45, n° 4, pp. 432-456. DOI [10.1177/1744259120988760](https://doi.org/10.1177/1744259120988760).
- DERNIE, David, 2003. *New Stone Architecture*. Laurence King Publishing. ISBN 978-1-85669-312-7.
- DESSANDIER, David, SAYAGH, Shahinaz, BROMLET, Philippe et LEROUX, Lise, 2009. La pierre de construction, matériau du développement durable. *Géosciences*. 2009. N° 10, pp. 8.
- DUCLOS-PRÉVET, Claire, 2024. *La modélisation de processus d'exploration numérique en architecture: design génératif, performance et optimisation*. Paris : Conservatoire national des arts et métiers.
- FLACH, Jacques, 1894. *Enquête sur les conditions de l'habitation en France: les maisons-type. T. 1*. Ministère de l'instruction publique et des beaux-arts, Comité des travaux historiques et scientifiques, section des sciences économiques et sociales. Disponible à l'adresse : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k753202>
- FREUDENBERG, P., RUISINGER, U. et STÖCKER, E., 2017. Calibration of Hygrothermal Simulations by the Help of a Generic Optimization Tool. *Energy Procedia*. 1 octobre 2017. Vol. 132, pp. 405-410. DOI [10.1016/j.egypro.2017.09.645](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.645).
- GAILLARD, Clément, 2022. *Moduler le climat : genèse, développement et significations de la conception bioclimatique en architecture (1947-1986)*. Thèse de doctorat. Paris 1. Disponible à l'adresse : <https://theses.fr/2022PA01H040>
- Guide RE 2020 : Réglementation Environnementale*, 2024. . Ministère de la Transition Écologique.
- GUILLEBAUD, Jean-Claude, 2014. *Une autre vie est possible Comment retrouver l'espérance*. Disponible à l'adresse : <https://www.fnac.com/a6530240/Jean-Claude-Guillebaud-Une-autre-vie-est-possible>
- GUNN, Sarah, 2012. *Stone House Construction*. Australia : CSIRO.
- HUGUETTE, Flatrès-Mury, 1970. *Matériaux et techniques de construction rurale dans l'Ouest de la France : L'exemple des confins normands, bretons et manceaux - Persée*.

- LECHNER, Norbert, 2014. *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*. John Wiley & Sons. ISBN 978-1-118-58242-8.
- M, Woloszyn, R, Peuhkuri, L, Mortensen et C, Rode, 2005. IEA Annex 41, Subtask 1 - Modelling principles and common exercises. 1 janvier 2005. Disponible à l'adresse : <https://www.aivc.org/resource/iea-annex-41-subtask-1-modelling-principles-and-common-exercises>
- MAISONS PAYSANNES DE FRANCES. *Amélioration Thermique du Bâti Ancien*. Disponible à l'adresse : <https://maisons-paysannes.org/restaurer-et-construire/fiches-conseils/amelioration-thermique-bati-ancien/>
- MAREF, Wahid, LACASSE, Michael et BOOTH, D., 2003. An Approach to validating computational models for hygrothermal analysis - full scale experiments. 1 janvier 2003.
- MEIRION-JONES, Gwyn, 1980. *L'architecture vernaculaire en Bretagne*. 1980.
- MÉTÉO-FRANCE, 2023. *Le climat en France métropolitaine*. 22 septembre 2023. Disponible à l'adresse : <https://meteofrance.com/comprendre-climat/france/le-climat-en-france-metropolitaine>
- MONDIN, Corinne et BOITHIAS, Jean-Louis, 1979. *La maison rurale en Normandie. Tome 2 : La Basse Normandie*. CREER.
- OLGYAY, Victor, YEANG, Ken, REYNOLDS, John, OLGAY, Victor et LYNDON, Donlyn, 2015. *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and expanded Edition*. Princeton : Princeton University Press. ISBN 978-1-4008-7368-5.
- PERRAUDIN, Gilles, 2013. *Construire en pierre de taille aujourd'hui: musée des vins et jardin ampélographique, Patrimoine, Haute-Corse*. Presses du réel. ISBN 978-2-84066-678-3.
- PESTRE, Tristan, 2021. *La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments*. phd thesis. Université d'Artois. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/tel-03521752>
- PETIT, Victor, 2024. *Milieu Tech. Beyond High Tech Low Tech*. Conférence. EPFL. 2024. Disponible à l'adresse : <https://youtu.be/U7BQEK8Oh00?si=G9X7shNGPizCUArY>
- PEYTREMANN, Édith, 2003. *Archéologie de l'habitat rural dans le nord de la France du IVE au XIIIe siècle. Volume 1*. 2003. Disponible à l'adresse : https://www.persee.fr/doc/mafam_1152-2518_2003_act_13_1
- PICON, Antoine, 2018. *La matérialité de l'architecture*. Parenthèses. ISBN 978-2-86364-320-4.
- PICOUT, Laurie, 2017. Utiliser la pierre est une solution morale et éthique. In : *Construire en pierre*. L'Architecture d'Aujourd'hui. pp. 42-49.
- Pierre : Révéler la ressource, explorer le matériau*, 2018. Pavillon de l'Arsenal.
- PRANGER, Susan, 2024. *Old Materials, New Climate: Traditional Building Materials in a Changing World*. New York : Routledge.
- Rénovation Thermique du bâti traditionnel Normand*, 2013. Région Basse-Normandie.
- RUBEL, Franz et KOTTEK, Markus, 2010. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*. 1 avril 2010. Vol. 19, pp. 135-141. DOI [10.1127/0941-2948/2010/0430](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430).
- RUISINGER, Ulrich et KAUTSCH, Peter, 2020. Comparison of hygrothermal 2D- and 3D-simulation results with measurements from a test house. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 172, pp. 08004. DOI [10.1051/e3sconf/202017208004](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017208004).
- SANSEN, Marjan, 2022. *Typologies architecturales et morphologies urbaines adaptées au climat méditerranéen*. phd thesis. Université de Montpellier. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/tel-04015624>
- SHEN, Xiaofei, SINGHVI, Aman, MENGUAL, Andrea, SPASTRI, Maria et WATSON, Victoria, 2018. Evaluating the Multi-Objective Optimization Methodology for Performance-Based Building Design in Professional Practice. In : *2018 Building Performance Analysis Conference and SimBuild*. ASHRAE/IBPSA-USA. 2018. pp. 646-653. SimBuild Conference. Disponible à l'adresse : https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=simbuild2018_C088
- SZOKOLAY, Steven V., 2008. *Introduction to Architectural Science: The basis of sustainable design*. 2nd edition. Routledge. ISBN 978-1-136-39331-0.
- VIDAL DE LA BLACHE, Paul, 2015. Les matériaux de construction. In : *Principes de géographie humaine: Publiés d'après les manuscrits de l'auteur par Emmanuel de Martonne*. Lyon : ENS Éditions. Bibliothèque idéale des sciences sociales. ISBN 978-2-84788-666-5.
- VISITAK, Sopa et HABERL, Jeff S., 2004. An analysis of design strategies for climate-controlled residences in selected climates. *Texas A&M University, College Station, TX*. 2004.
- VITRUVÉ, 1847. *De l'Architecture. Tome I. Livre II*. Traduction nouvelle par M. Ch.-L. Maufras, etc.
- WINKLER, Erhard M., 1997. *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Third, Completely Revised and Extended Edition. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin / Heidelberg. ISBN 978-3-662-10072-1.

Table des figures

Figure 1: Immeuble quai de la mairie à Marseille par Fernand Pouillon (Source : http://archi.climatic.free.fr/0822.html)	16
Figure 2 : Analyse du vernaculaire à l'aide de méthodes (Source : Auteur)	19
Figure 3 : Comprendre les différents impacts des paramètres d'une paroi en pierre (Source : Auteur)	20
Figure 4 : Lier les deux premières étapes dans une analyse paramétrique et optimisée (Source : Auteur)	20
Figure 5 : Carte de classification des climats selon la méthode Köppen-Geiger (source : site officiel de la classification ; https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm)	23
Figure 6 : L'homme comme mesure centrale en architecture (source : OLYGAY, 2015, p.14)	24
Figure 7 : Facteur d'habillement (source : Climate and Built Form, cours dirigé par Luca Finocchiaro à la NTNU)	24
Figure 8 : Graphique psychrométrique de Szokolay (source : SZOKOLAY, 2008, p.13)	25
Figure 9 : Zone de confort dans le graphique psychrométrique en lien avec les différents types de climats (Source : LECHNER, 2014)	26
Figure 10 : Évolution de la forme en fonction du climat (source : LECHNER, 2014, p.16)	27
Figure 11 : Approche des trois tiers (Source : LECHNER, 2014, p.13)	27
Figure 12 : Forme optimale selon la zone climatique (Source : OLYGAY, 2015, p.89)	28
Figure 13 : Les trois types principaux de chauffage solaire passifs avec gain direct (Source : LECHNER, 2014)	28
Figure 14 : Coupe schématique de la Balcomb House et de son fonctionnement passif (Source : LECHNER, 2014)	29
Figure 15 : « Givoni-Milne bioclimatic chart © 1981 (1981 ref. Diamond et al. 1993) » (Source : VISITAK et al., 2004)	29
Figure 16 : Méthodologie d'Amos Rapoport pour l'analyse du vernaculaire (Source : DAHL, 2010)	31
Figure 17 : Schéma méthode EBS (Source : Auteur)	31
Figure 18 : Classification des climats de Köppen-Geiger présentée sur son site officiel et visualisable sur Google Earth (Source : https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm)	32
Figure 19 : Présentation des cinq climats en France par Météo France (Source : Météo France, 2023)	33
Figure 20 : Grandes zones climatiques de la RT2012 et RE2020 (Source : calculcee.fr)	34
Figure 21 : Zone climatiques de la RT2012 et de la RE2020 (Source : Wikipédia)	34
Figure 22 : Moyenne de la température annuelle (Source : Météo France, 2023)	34
Figure 23 : Moyenne annuelle de l'énergie solaire reçue sur une façade orientée au sud et inclinée d'un angle égal à la latitude en kWh/m ² /jour (Source : Tecsol)	35
Figure 24 : Moyenne annuelle des précipitations (Source : Météo France, 2023)	35
Figure 25 : Moyenne annuelle du nombre de jour avec une pluie journalière significative (Source : Météo France, 2023)	35
Figure 26 : Ensoleillement annuel en nombre d'heure (Source : Météo France, 2023)	35
Figure 27 : La pierre (Source : BOITHIAS et MONDIN, 1979)	37
Figure 28 : Maison à colombage (bois et torchis) (Source : BOITHIAS et MONDIN, 1979)	37
Figure 29 : Le chaume (Source : BOITHIAS et MONDIN, 1979)	37
Figure 30 : Comparaison entre les différences de température journalière entre intérieur et extérieur selon les différents types de parois (Source : DAHL, 2010)	38
Figure 31 : Impact du ratio entre surface de façade et surface au sol (Source : GUNN, 2012)	39
Figure 32 : Organisation spatiale adaptée au climat tempéré dans l'hémisphère sud (Source : GUNN, 2012)	40
Figure 33 : Organisation spatiale adaptée au climat tempéré dans l'hémisphère nord (Source : Auteur)	40
Figure 34 : Carte géologique simplifiée de la France par nature géologique de terrain avec superposition des 559 carrières fournissant des ROC (Source : BRGM, 2014)	41

Figure 35 : Étapes de formation du béton et de la pierre jusqu'à la mise en œuvre (Source : Pierre, Révéler la ressource, Explorer le matériau, exposition présentée en 2018 au Pavillon de l'Arsenal)	43
Figure 36 : L'écran climatique qui sépare entre l'intérieur et l'extérieur (Source : DAHL, 2010)	45
Figure 37 : Déconstruction du cube de confort en 4 sous-ensembles (Source : DAHL, 2010)	46
Figure 38 : Analogie avec le pull et le K- WAY (Source : Illustration de LM Ingénieur).....	46
Figure 39 : Échanges d'humidité (Source : ATHEBA)	47
Figure 40 : Comparaison entre Béton de Chanvre et Laine de Merinos (Source : Illustration de LM Ingénieur)	48
Figure 41 : Mur ancien en fonctionnement normal et après une mauvaise rénovation (Source : ATHEBA)	48
Figure 42 : Comparaison entre bâti ancien et bâti moderne (Source : ATHEBA)	48
Figure 43 : Échange de chaleur entre deux sources (Source : Auteur)	49
Figure 44 : Mouvement et température de l'air au contact d'une paroi (Source : Auteur)	50
Figure 45 : Convection au niveau de la paroi (Source : Auteur).....	50
Figure 46 : Évolution de la température au niveau de la paroi (Source : Auteur).....	50
Figure 47 : Valeurs des coefficients et résistance de transmission thermique par convection dans le bâtiment (Source : Cours de Thermique, Clément Trouche)	50
Figure 48: Échange par rayonnements thermiques (Source : Cours de Thermique, Clément Trouche).....	50
Figure 49 : Ressenti selon la température de la paroi (Source : ATHEBA)	51
Figure 50 : Inertie et déphasage des différents type de pierres (Source : Région Basse-Normandie, 2013).....	51
Figure 51 : Exemple de sensation de paroi froide	52
Figure 52 : Échanges thermiques entre l'homme et son environnement (Source : COURGEY et OLIVA, 2008).....	52
Figure 53 : Lien entre porosité et force de compression uni axiale (Source : WINKLER, 1997)	53
Figure 54 : Absorption de l'humidité en fonction de l'humidité relative (Source : WINKLER, 1997)	54
Figure 55: Résumé des principales caractéristiques des différentes pierres (Source : Réalisé par Auteur, données tirées de RBN, 2013)	55
Figure 56 : Valeurs de U et de R pour des parois en pierre non isolées selon les types de pierre employés (Source : Auteur).....	55
Figure 57 : Schéma du transport d'humidité dans les poreux (Source : PESTRE, 2021)	55
Figure 58 : Système hypothétique de pores dans les pierres poreuses, ici une roche dolomite, dessiné avec deux quantités d'eau différentes (Source : WINKLER, 1997).....	55
Figure 59 : Température de surface d'une surface de pierre blanche et noire à différentes heures d'un jour en Juin et Janvier, proche de Whashington (Source : WINKLER, 1997).....	55
Figure 60 : Conductivité et résistance à la conductivité des différentes pierres (Source : Région Basse-Normandie, 2013)	56
Figure 61 : Température d'une pierre en fonction de son épaisseur, puis comparaison sur une journée en relation avec la température de l'air extérieur (Source : WINKLER, 1997)	56
Figure 62 : Tableau de température de surface et de 5cm en profondeur selon différents types de pierre (Source : WINKLER, 1997).....	57
Figure 63 : Transferts thermiques par conduction pour différentes parois et temps de réponse (Source : GUNN, 2012)	58
Figure 64 : Inertie et déphasage des différents type de pierres (Source : Région Basse-Normandie, 2013).....	58
Figure 65 : Classes d'inerties selon les parois et matériaux (Source : Région Basse-Normandie, 2013).....	58
Figure 66 : Principe bioclimatique d'orientation d'une maison en Australie (Source : Stone GUNN, 2012).....	58
Figure 67 : Principaux échanges entre l'intérieur et l'extérieur pour une maison bioclimatique en Australie (Source : GUNN, 2012)	58
Figure 68 : Conductivité thermique des pierres en fonction de la teneur en eau massique (Source : PESTRE, 2021)	59
Figure 69 : Efficacité des décisions prises pour un projet par rapport au temps (Source : LECHNER, 2014)	62

Figure 70 : Coût de quelques solutions utilisables pour réaliser un bâtiment durable (Source : LECHNER, 2014).....	63
Figure 71 : Les cinq étapes de la mise en pratique d'un processus d'ENAPE (Source : SHEN, X., et al., 2018).....	70
Figure 72 : Le diagramme de flux des données pour faire de l'ENAPE avec l'écosystème développé autour de Rhino et de Grasshopper (Source : DUCLOS-PRÉVET, 2024)	70
Figure 73 : Visualisation de l'évolution de la température et de l'humidité dans la paroi après la simulation sous format vidéo (Source : Auteur).....	73
Figure 74 : Paramétrage de la température et humidité de l'air à l'année côté intérieur (Source : Auteur).....	73
Figure 75 : Gestion des matériaux et épaisseurs composants la paroi (Source : Auteur).....	73
Figure 76 : Interface des WUFI pour les paramètres de la paroi (Source : Auteur).....	73
Figure 77 : Utilité de LadyBug (Source : Food4Rhino ; LadyBug Tools).....	74
Figure 78 : Plugins compris dans LadyBug Tools (Source : Food4Rhino ; LadyBug Tools).....	74
Figure 79 : Utilité de HoneyBee (Source : Food4Rhino ; LadyBug Tools)	74
Figure 80 : Différents fruits de la paroi analysés	76
Figure 81 : Différentes épaisseurs de murs de pierres simulées	76
Figure 82 : Combinaisons testées	76
Figure 83 : Positionnement des deux zones d'étude (Source : Auteur).....	80
Figure 84 : Graphique Psychrométrique pour la ville de Rennes (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022)).....	81
Figure 85 : Moyennes journalières par mois de la température et de l'humidité de l'air à Rennes, Besoin estimé des quantités d'heures de refroidissement et de chauffage (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022)).....	81
Figure 86 : Rose des vents annuelle selon sa vitesse et sa température de la ville de Rennes (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))	82
Figure 87 : Course du soleil et radiation solaire de la ville de Rennes (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022)).....	82
Figure 88 : Maison en pierre porteuse dans la plaine de Caen, Normandie (Source : MONDIN, 1979).....	83
Figure 89 : Plan de maison longue, assemblage de plusieurs maisons dans le Morbihan, Bretagne (Source : MEIRION-JONES, 1980).....	84
Figure 90 : Plan de maison à pièces multiples dans le Finistère, Bretagne (Source : MEIRION-JONES, 1980).....	84
Figure 91 : Graphique Psychrométrique pour la ville de Marseille (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022)).....	85
Figure 92 : Moyennes journalières par mois de la température et de l'humidité de l'air à Marseille, Besoin estimé des quantités d'heures de refroidissement et de chauffage (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022)).....	85
Figure 93 : Course du soleil et radiation solaire de la ville de Marseille (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022)).....	86
Figure 94 : Rose des vents annuelle selon sa vitesse et sa température de la ville de Marseille (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022)).....	86
Figure 95 : Orientation de la maison Provençale (Source : FLACH, 1894).....	88
Figure 96 : Plan d'une maison provençale (Source : FLACH, 1894)	88
Figure 97 : Tableau des propriétés physiques et thermiques de différentes pierres (Source : Données de RBN, 2013).....	89
Figure 98 : Tableau des valeurs utilisées pour les simulations dans WUFI (Source : Données de PESTRE, 2021).....	90
Figure 99 : Tableau des teneurs en eau massique en fonction du taux d'humidité relative dans la pierre (Source : Données de PESTRE, 2021)	90
Figure 100 : Tableau des teneurs en eau volumiques en fonction du taux d'humidité relative dans la pierre (Source : Données de PESTRE, 2021)	90
Figure 101 : Facteur de résistance à la vapeur d'eau en fonction du taux d'humidité relative dans la pierre (Source : Données de PESTRE, 2021)	90

Figure 102 : Tableau des valeurs utilisées pour les simulations dans WUFI pour le béton de chanvre (Source : TRAN LE, 2010 et CERZO, 2005)	90
Figure 103 : Tableau des propriétés physiques et thermiques de différentes pierres (Source : Données de RBN, 2013)	95
Figure 104 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur).....	95
Figure 105 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différents types de pierre analysés à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	95
Figure 106 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	96
Figure 107 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	96
Figure 108 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	96
Figure 109 : Évolution de la température de surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	96
Figure 110 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différents types de pierre analysés à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	97
Figure 111 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	98
Figure 112 : Évolution de la température de surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	98
Figure 113 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	98
Figure 114 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	98
Figure 115 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes orientations de la paroi analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	99
Figure 116 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	100
Figure 117 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	100
Figure 118 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	100
Figure 119 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	100
Figure 120 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes orientations de la paroi analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	101
Figure 121 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	102
Figure 122 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	102
Figure 123 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	102
Figure 124 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	102
Figure 125 : Différents fruits de la paroi analysés	103
Figure 126 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différents fruits de la paroi analysés à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	103
Figure 127 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	104

Figure 128 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	104
Figure 129 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	104
Figure 130 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	104
Figure 131 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différents fruits de la paroi analysés à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	105
Figure 132 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	106
Figure 133 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	106
Figure 134 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	106
Figure 135 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	106
Figure 136 : Comparaison entre les conductivités thermiques (pierres sèches et saturées en eau) des différentes pierres calcaires analysées (Source : Auteur)	108
Figure 137 : Tableau des valeurs utilisées pour les simulations dans WUFI (Source : Auteur, données de PESTRE, 2021)	108
Figure 138 : Tableau des propriétés physiques et thermiques de différentes pierres (Source : Données de RBN, 2013)	108
Figure 139 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)	109
Figure 140 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes pierres calcaires analysés à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	109
Figure 141 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	110
Figure 142 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	110
Figure 143 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	110
Figure 144 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	110
Figure 145 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)	111
Figure 146 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes pierres calcaires analysés à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	111
Figure 147 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	112
Figure 148 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	112
Figure 149 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	112
Figure 150 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	112
Figure 151 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur)	113
Figure 152 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes épaisseurs de paroi analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	113
Figure 153 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	114

Figure 154 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	114
Figure 155 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	114
Figure 156 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	114
Figure 157 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur).....	115
Figure 158 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes épaisseurs de paroi analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	115
Figure 159 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	116
Figure 160 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	116
Figure 161 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	116
Figure 162 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	116
Figure 163 : Évolution du coefficient de déperdition thermique en fonction de l'épaisseur des deux pierres étudiées et du béton de chanvre (Source : Auteur).....	118
Figure 164 : Tableau des valeurs utilisées pour les simulations dans WUFI pour le béton de chanvre (Source : TRAN LE, 2010 et CEREZO, 2005)	118
Figure 165 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur).....	119
Figure 166 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 15/50 (Source : WUFI, auteur)	119
Figure 167 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	119
Figure 168 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	120
Figure 169 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	120
Figure 170 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	120
Figure 171 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	120
Figure 172 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur).....	121
Figure 173 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 15/50 (Source : WUFI, auteur)	121
Figure 174 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	121
Figure 175 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	122
Figure 176 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	122
Figure 177 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	122
Figure 178 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	122
Figure 179 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	123

Figure 180 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 50/15 (Source : WUFI, auteur)	123
Figure 181 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 50/15 (Source : WUFI, auteur)	123
Figure 182 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	124
Figure 183 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	124
Figure 184 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	124
Figure 185 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	124
Figure 186 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	125
Figure 187 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	126
Figure 188 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	126
Figure 189 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	126
Figure 190 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	126
Figure 191 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur).....	127
Figure 192 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 20/5/20 (Source : WUFI, auteur).....	127
Figure 193 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	127
Figure 194 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	128
Figure 195 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	128
Figure 196 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	128
Figure 197 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	128
Figure 198 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur).....	129
Figure 199 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 20/5/20 (Source : WUFI, auteur).....	129
Figure 200 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	129
Figure 201 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	130
Figure 202 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	130
Figure 203 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	130
Figure 204 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	130
Figure 205 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur).....	131

Figure 206 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 20/5/20 (Source : WUFI, auteur).....	131
Figure 207 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	131
Figure 208 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	132
Figure 209 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	132
Figure 210 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	132
Figure 211 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	132
Figure 212 : Tableau des coefficients de déperdition et résistances thermiques des différentes pierres pour des épaisseurs données (Source : Auteur).....	133
Figure 213 : Évolution de la température, de l'humidité et de la teneur en eau sur une année selon l'épaisseur d'une paroi 20/5/20 (Source : WUFI, auteur).....	133
Figure 214 : Tableau des températures et humidités relatives minimales et maximales de la surface intérieure sur une année pour les différentes combinaisons analysées à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	133
Figure 215 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	134
Figure 216 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	134
Figure 217 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	134
Figure 218 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	134
Figure 219 : Tableau récapitulatif des simulations réalisées dans la zone Sud-Est et des paramètres utilisés (Source : Auteur).....	138
Figure 220 : Tableau récapitulatif des simulations réalisées dans la zone Nord-Ouest et des paramètres utilisés (Source : Auteur).....	138
Figure 221 : Partie du script Grasshopper ayant pour but de calculer T _{sol-air} pour chaque période d'analyse selon le fichier EPW du climat dans lequel est réalisé l'étude (Source : Auteur).....	140
Figure 222 : Automatisation de la compilation des résultats, des paramètres et des visualisations à l'aide du plugin Colibri (Source : Auteur).....	140
Figure 223 : Partie du script Grasshopper ayant pour but de calculer Q _c pour chaque face de la maison et de les combiner pour calculer Q _{total} (Source : Auteur).....	140
Figure 224 : Éléments paramétriques à implémenter comme variable de design pour l'optimisation multi-critère (Source : Auteur).....	140
Figure 225 : Script Grasshopper complet utilisé pour les simulations sol-air (Source : Auteur).....	140
Figure 226 : Évolution de Q et de T _{sol-air} pour un ratio 2_1 pour le cycle de température (1 niveau).....	141
Figure 227 : Évolution de Q et de T _{sol-air} pour un ratio 2_1 pour le cycle solaire (1 niveau).....	141
Figure 228 : Évolution de Q [W] d'une journée d'hiver, d'été et à l'équinoxe, selon le cycle de température, pour différents ratios de maisons, à Rennes (Source : Auteur, réalisé à l'aide de Grasshopper).....	142
Figure 229 : Évolution de Q [W] d'une journée d'hiver, d'été et à l'équinoxe, selon le cycle solaire, pour différents ratios de maisons, à Rennes (Source : Auteur, réalisé à l'aide de Grasshopper).....	142
Figure 230 : Évolution de Q et de T _{sol-air} pour un ratio 1.5_1 pour le cycle de température (1 niveau).....	143
Figure 231 : Évolution de Q et de T _{sol-air} pour un ratio 1.5_1 pour le cycle solaire (1 niveau).....	143
Figure 232 : Évolution de Q [W] d'une journée d'hiver, d'été et à l'équinoxe, selon le cycle de température, pour différents ratios de maisons, à Marseille (Source : Auteur, réalisé à l'aide de Grasshopper).....	144
Figure 233 : Évolution de Q [W] d'une journée d'hiver, d'été et à l'équinoxe, selon le cycle solaire, pour différents ratios de maisons, à Marseille (Source : Auteur, réalisé à l'aide de Grasshopper).....	144

Figure 234 : Définition des températures limites pour le refroidissement, le chauffage et la ventilation naturelle (Source : Auteur)	147
Figure 235 : Exemple de mise en place d'une pièce HoneyBee à partir d'une géométrie (Rhino ou Grasshopper) avec les paramètres de chaque face (Source : Auteur)	147
Figure 236 : Création d'un matériau de construction opaque à partir des données sur le matériau (Source : Auteur)	147
Figure 237 : Script Grasshopper complet pour la Simulation Thermique Dynamique de la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	147
Figure 238 : Partie du script permettant de créer les différentes combinaisons de parois étudiées à partir de différents matériaux définis (Source : Auteur)	147
Figure 239 : Définition paramétrique des dimensions de la maison selon le ratio choisi pour la maison simplifiée (Source : Auteur)	148
Figure 240 : Script de modélisation paramétrique de la maison simplifiée pour les STD (Source : Auteur).....	148
Figure 241 : Définition rapide du modèle Honeybee pour la maison simplifiée (Source : Auteur).....	148
Figure 242 : Définition paramétrique des ratios d'ouvertures selon l'orientation de la façade pour la maison simplifiée (Source : Auteur).....	148
Figure 243 : Visualisation du modèle 3D de la STD de la maison vernaculaire de la zone Nord-Ouest (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))	149
Figure 244 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))	150
Figure 245 : Équilibre des charges thermiques de la maison vernaculaire dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))	150
Figure 246 : Visualisation du modèle 3D de la STD de la maison vernaculaire de la zone Sud-Est (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022)).....	151
Figure 247 : Équilibre des charges thermiques de la maison vernaculaire dans la zone Sud-Est (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022)).....	152
Figure 248 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur, réalisé avec Ladybug Tools (Roudsari & Pak, 2022))	152
Figure 249 : Maisons simulées selon les différents ratios de l'approche sol-air avec 1 et 2 niveaux (Source : Auteur).....	153
Figure 250 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différents ratios dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	153
Figure 251 : Maisons simulées selon les différents ratios de l'approche sol-air avec 1 et 2 niveaux (Source : Auteur).....	154
Figure 252 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différents ratios dans la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	154
Figure 253 : Maison 1.5_1 orientée à -12° par rapport au Sud (Source : Auteur).....	155
Figure 254 : Maison 1.5_1 orientée au Sud (Source : Auteur)	155
Figure 255 : Maison 1.5_1 orientée à +12° par rapport au Sud (Source : Auteur).....	155
Figure 256 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différentes orientations simulées dans la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	155
Figure 257 : Modèle 3D et équilibre des charges thermiques pour la maison après choix du ratio 2_1 dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	156
Figure 258 : Modèle 3D et équilibre des charges thermiques pour la maison après choix du ratio 1.5_1 et de l'orientation à 12° par rapport au Sud dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)	156
Figure 259 : Différents ratios d'ouverture au sud simulés (Source : Auteur).....	157
Figure 260 : Ratio d'ouverture conservé pour la maison au Nord (Source : Auteur)	157
Figure 261 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différents ratios d'ouverture simulés pour chaque orientation dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	157
Figure 262 : Différents ratios d'ouverture au Nord simulés (Source : Auteur)	158

Figure 263 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différents ratios d'ouverture simulés pour chaque orientation dans la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	158
Figure 264 : Comparaison entre différentes combinaisons (Source : Auteur).....	160
Figure 265 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différentes parois verticales dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	160
Figure 266 : Comparaison entre différentes épaisseurs (Source : Auteur).....	160
Figure 267 : Comparaison entre différentes pierres (Source : Auteur)	160
Figure 268 : Comparaison entre différentes combinaisons (Source : Auteur).....	162
Figure 269 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différentes parois verticales dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	162
Figure 270 : Comparaison entre différentes épaisseurs (Source : Auteur).....	162
Figure 271 : Comparaison entre différentes pierres (Source : Auteur)	162
Figure 272 : Modèle 3D avec sous-sol dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	163
Figure 273 : Comparaison entre les différentes solutions pour le sol dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	163
Figure 274 : Modèle 3D avec sous-sol dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)	163
Figure 275 : Comparaison entre les différentes solutions pour le sol dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	163
Figure 276 : Maisons simulées selon les différentes protections solaires, ici 30cm, dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	164
Figure 277 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement pour les différentes distances entre le vitrage et la surface extérieure dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	164
Figure 278 : Équilibre des charges thermiques de la maison théorique avec pièces dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	165
Figure 279 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement avec et sans pièces dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	165
Figure 280 : Visualisation du modèle 3D de la STD de la maison avec pièces de la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	166
Figure 281 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur).....	166
Figure 282 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement avec et sans pièces dans la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	167
Figure 283 : Équilibre des charges thermiques de la maison théorique avec pièces dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)	167
Figure 284 : Visualisation du modèle 3D de la STD de la maison avec pièces de la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	168
Figure 285 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur).....	168
Figure 286 : Modélisation 3D, Visualisation 3D et équilibre des charges thermiques après ajout de l'espace tampon à l'Ouest (Source : Auteur).....	170
Figure 287 : Modélisation 3D, Visualisation 3D et équilibre des charges thermiques après ajout du mur Trombe à l'Est (Source : Auteur).....	170
Figure 288 : Évolution des besoins en chauffage et en refroidissement avec les différentes solutions passives (Source : Auteur).....	170
Figure 289 : Modèle 3D de la STD de la maison avec la protection solaire en toiture (Source : Auteur).....	171
Figure 290 : Modèle 3D de la STD de la maison avec la protection solaire en toiture et les brise-soleils au Sud (Source : Auteur).....	171
Figure 291 : Modèle 3D de la STD de la maison avec la protection solaire en toiture, les brise-soleils au Sud et la Pergola au Sud (Source : Auteur)	171
Figure 292 : Évolution des besoins en chauffage et en refroidissement avec les différentes protections solaires (Source : Auteur)	171

Figure 293 : Modélisation 3D, Visualisation 3D et équilibre des charges thermiques après ajout de l'espace tampon à l'Ouest (Source : Auteur).....	172
Figure 294 : Modélisation 3D après ajout de la végétation (Source : Auteur).....	172
Figure 295 : Évolution des besoins en chauffage et en refroidissement avec les différentes solutions passives (Source : Auteur).....	172
Figure 296 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur).....	173
Figure 297 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement de la maison vernaculaire et de celle améliorée dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	173
Figure 298 : Équilibre des charges thermiques de la maison vernaculaire améliorée dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	173
Figure 299 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur).....	174
Figure 300 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement de la maison vernaculaire et de celle améliorée dans la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	174
Figure 301 : Équilibre des charges thermiques de la maison vernaculaire améliorée dans la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	174
Figure 302 : Maison théorique finale pour la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	175
Figure 303 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur).....	175
Figure 304 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement à Rennes et à Marseille (Source : Auteur).....	175
Figure 305 : Équilibre des charges thermiques de la maison théorique (n°50) de la zone Nord-Ouest à Marseille (Source : Auteur).....	175
Figure 306 : Maison théorique finale pour la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	176
Figure 307 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas) (Source : Auteur).....	176
Figure 308 : Comparaison des besoins en chauffage et en refroidissement à Rennes et à Marseille (Source : Auteur).....	176
Figure 309 : Équilibre des charges thermiques de la maison théorique (n°54) de la zone Sud-Est à Rennes (Source : Auteur).....	176
Figure 310 : Tableau récapitulatif des résultats de toutes les solutions conservées dans la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	180
Figure 311 : Tableau récapitulatif des résultats de toutes les solutions conservées dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	180
Figure 312 : Tableau récapitulatif des paramètres et résultats de toutes les STD réalisées dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	181
Figure 313 : Tableau récapitulatif des paramètres et résultats de toutes les STD réalisées dans la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	182
Figure 314 : Méthode de conception adaptée aux méthodes de conception bioclimatiques (Source : Auteur).....	188

Annexes

Table des Annexes

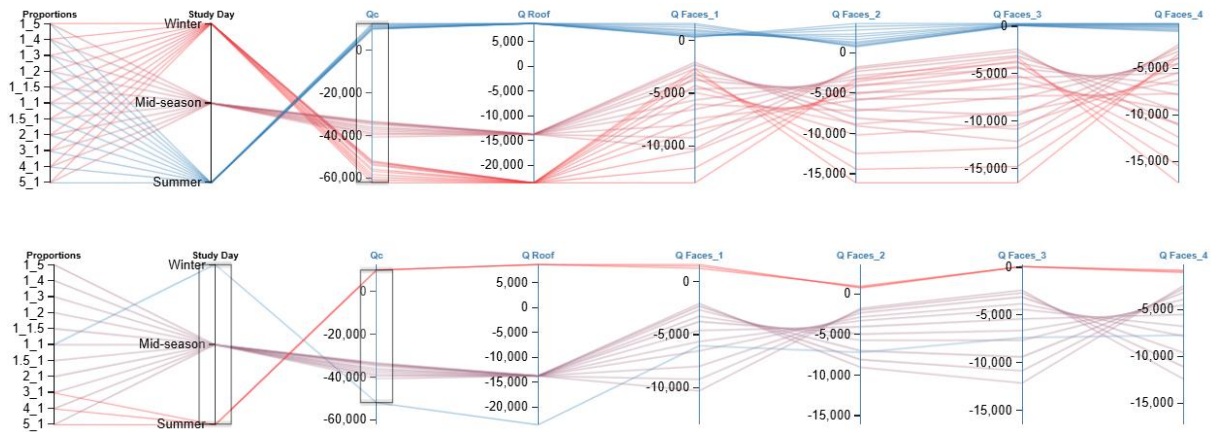
Annexe 1 : Évolution du pourcentage d'humidité dans la pierre en fonction de la taille des pores (Source : WINKLER, 1997, p.148)	215
Annexe 2 : Visualisation de la simulation sol-air de Rennes du cycle solaire dans Design Explorer 2.....	215
Annexe 3 : Visualisation de la simulation sol-air de Rennes du cycle température dans Design Explorer 2	215
Annexe 4 : Temps de pénétration de l'humidité selon la profondeur dans la pierre (Source : WINKLER, 1997, p.147)	216
Annexe 5 : Différence entre un bon et un pauvre traitement d'une façade en pierre en fonction du type de pierre employé et de la résistance à l'humidité (Source : WINKLER, 1997, p.150)	216
Annexe 6 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	217
Annexe 7 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	217
Annexe 8 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	217
Annexe 9 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	217
Annexe 10 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	217
Annexe 11: Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	218
Annexe 12 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	218
Annexe 13 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	218
Annexe 14 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	218
Annexe 15 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	218
Annexe 16 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	219
Annexe 17 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	219
Annexe 18 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	219
Annexe 19 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	219
Annexe 20 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	219
Annexe 21 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	220
Annexe 22 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	220
Annexe 24 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	220
Annexe 24 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	220
Annexe 25 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	220

Annexe 26 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	221
Annexe 27 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	221
Annexe 28 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	221
Annexe 29 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	221
Annexe 30 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	221
Annexe 31 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	222
Annexe 32 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	222
Annexe 33 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	222
Annexe 34 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	222
Annexe 35 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	222
Annexe 36 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	223
Annexe 37 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	223
Annexe 38 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	223
Annexe 39 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	223
Annexe 40 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	223
Annexe 41 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	224
Annexe 42 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	224
Annexe 43 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	224
Annexe 44 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	224
Annexe 45 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	224
Annexe 46 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	225
Annexe 47 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	225
Annexe 48 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	225
Annexe 49 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	225
Annexe 50 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	225
Annexe 51 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	226

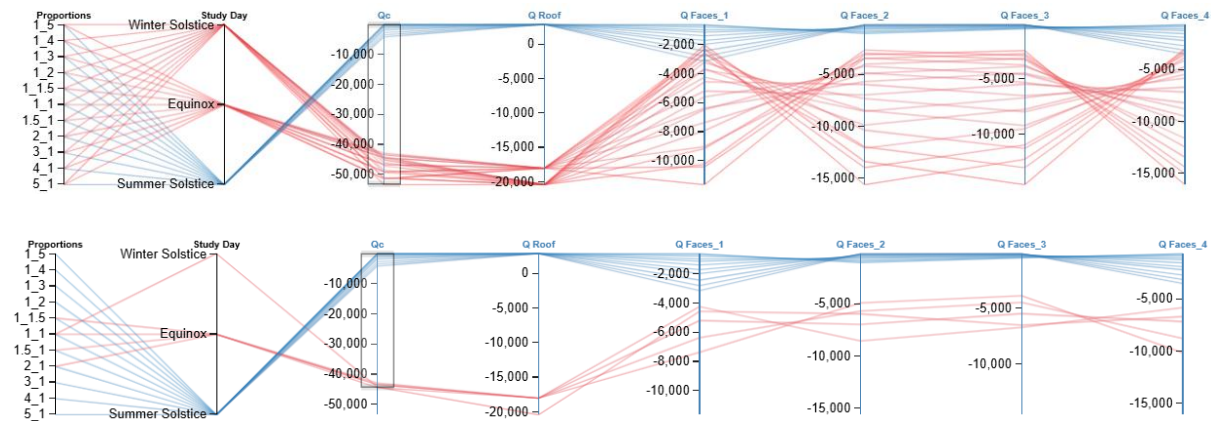
Annexe 52 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	226
Annexe 53 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	226
Annexe 54 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	226
Annexe 55 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	226
Annexe 56 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	227
Annexe 57 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	227
Annexe 58 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	227
Annexe 59 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	227
Annexe 60 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	227
Annexe 61 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	228
Annexe 62 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	228
Annexe 63 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	228
Annexe 64 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	228
Annexe 65 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	228
Annexe 66 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	229
Annexe 67 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	229
Annexe 68 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	229
Annexe 69 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	229
Annexe 70 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur).....	229
Annexe 71 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	230
Annexe 72 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	230
Annexe 73 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	230
Annexe 75 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	230
Annexe 75 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	230
Annexe 76 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	231
Annexe 77 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	231

Annexe 78 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	231
Annexe 79 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	231
Annexe 80 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	231
Annexe 81 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	232
Annexe 82 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	232
Annexe 83 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	232
Annexe 84 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	232
Annexe 85 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	232
Annexe 86 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	233
Annexe 87 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	233
Annexe 88 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	233
Annexe 89 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	233
Annexe 90 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)	233
Annexe 91 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	234
Annexe 92 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	234
Annexe 93 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	234
Annexe 94 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur).....	234
Annexe 95 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)	234
Annexe 96 : Taux de présence défini pour les usagers dans la définition du programme (Source : Auteur)	235
Annexe 97 : Compilation paramétrique des besoins estimés pour le chauffage et le refroidissement en une phrase complète affichée en titre de graphique (Source : Auteur)	235
Annexe 98 : Assemblage des pièces HoneyBee pour créer un modèle complet (Source : Auteur)	235
Annexe 99 : Affichage dans Rhino des éléments créés dans Grasshopper (Source : Auteur)	236
Annexe 100 : Exemple de création graphique paramétrée en fonction des résultats, affiché dans Rhino (Source : Auteur)	236
Annexe 101 : Création des éléments de constructions des portes et fenêtres (Source : Auteur)	236
Annexe 102 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas), ratio 2_1 dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	237
Annexe 103 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas), ratio 1.5_1 dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)	237
Annexe 104 : Équilibre des charges thermiques après définition du ratio d'ouverture sur chaque façade de la maison dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	238

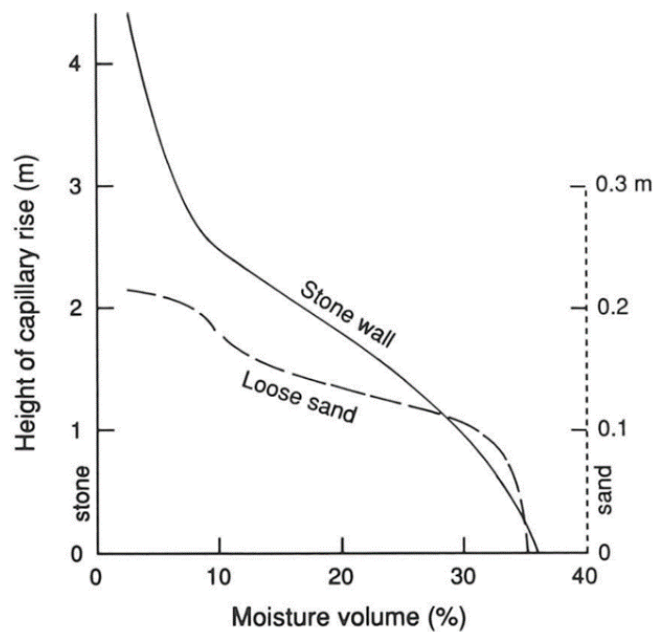
Annexe 105 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas), ouvertures dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)	238
Annexe 106 : Équilibre des charges thermiques après définition du ratio d'ouverture sur chaque façade de la maison dans la zone Sud-Est (Source : Auteur).....	238
Annexe 107 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec des murs en pierre de SVF de 60cm d'épaisseur dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	239
Annexe 108 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec des murs en pierre de SVF et du béton de chanvre de part et d'autre dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	239
Annexe 109 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec des murs en pierre de VPDG de 60cm d'épaisseur dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)	239
Annexe 110 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec des murs en pierre de VPDG et du béton de chanvre de part et d'autre dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)	240
Annexe 111 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec un sol en pierre de SVF de 30cm d'épaisseur dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	240
Annexe 112 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec un sol en pierre de VPDG de 30cm d'épaisseur dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)	240
Annexe 113 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	241
Annexe 114 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)	241
Annexe 115 : Modélisation 3D de la maison finale théorique avec les espaces tampons dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	242
Annexe 116 : Modélisation 3D de la maison finale théorique avec les espaces tampons dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)	242
Annexe 117 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale avec des murs en pierre de SVF de 60cm d'épaisseur dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur).....	243
Annexe 118 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale avec des murs en pierre de SVF de 60cm d'épaisseur de la zone Nord-Ouest à Marseille (Source : Auteur)	243
Annexe 119 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale avec des murs en pierre de VPDG de 60cm d'épaisseur de la zone Sud-Est à Rennes (Source : Auteur).....	243



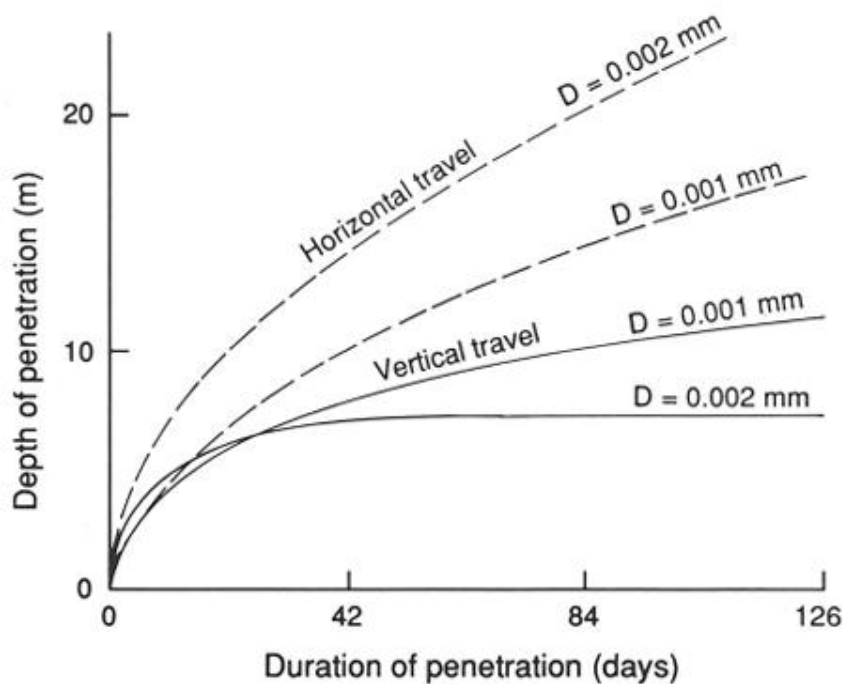
Annexe 3 : Visualisation de la simulation sol-air de Rennes du cycle température dans Design Explorer 2



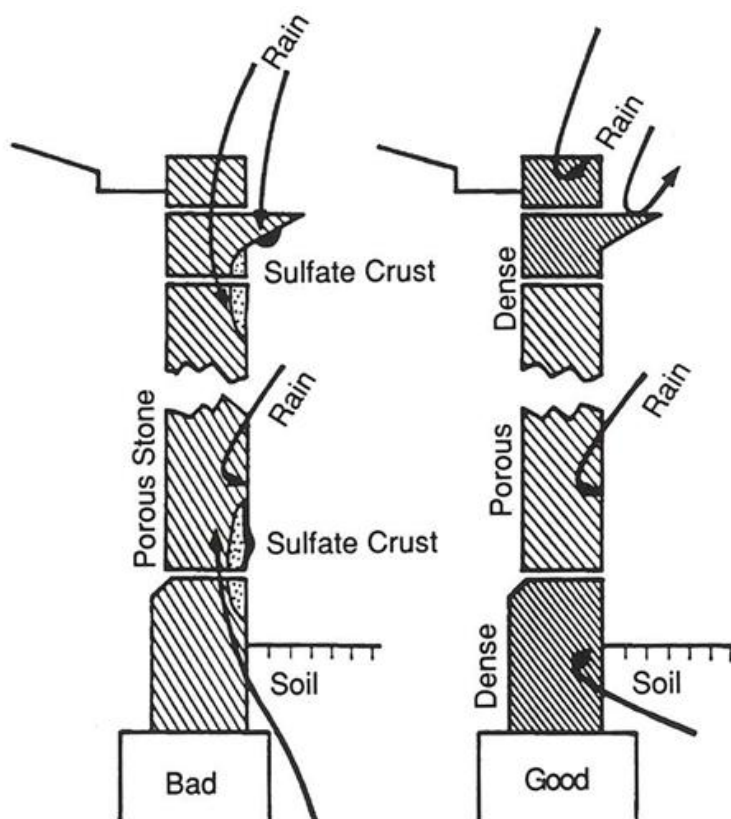
Annexe 2 : Visualisation de la simulation sol-air de Rennes du cycle solaire dans Design Explorer 2



Annexe 1 : Évolution du pourcentage d'humidité dans la pierre en fonction de la taille des pores (Source : WINKLER, 1997, p.148)

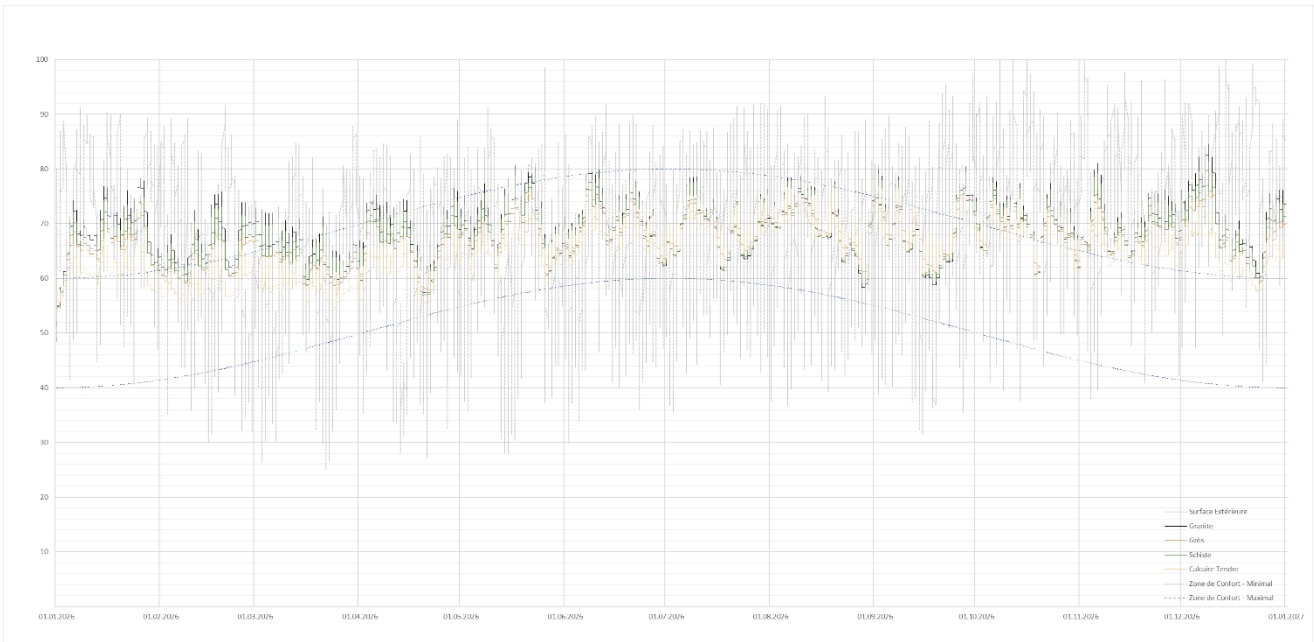


Annexe 4 : Temps de pénétration de l'humidité selon la profondeur dans la pierre (Source : WINKLER, 1997, p.147)

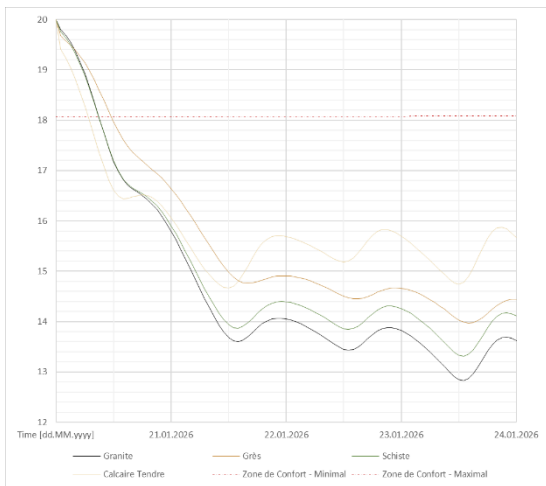


Annexe 5 : Différence entre un bon et un pauvre traitement d'une façade en pierre en fonction du type de pierre employé et de la résistance à l'humidité (Source : WINKLER, 1997, p.150)

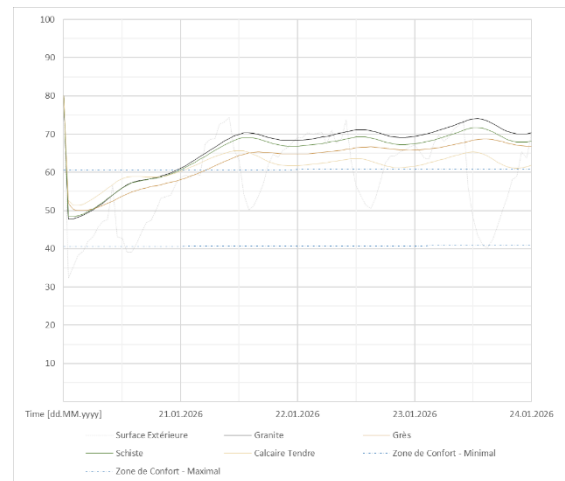
Types de pierres – Zone Nord-Ouest



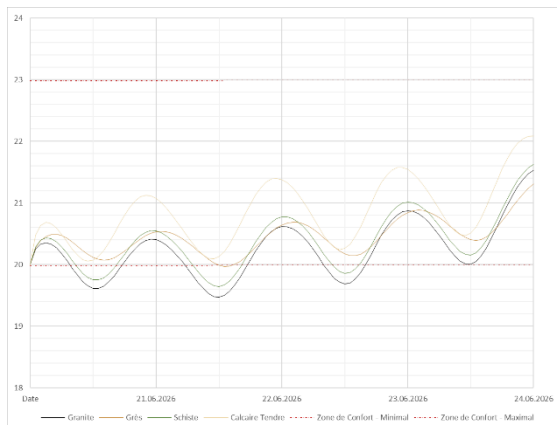
Annexe 8 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



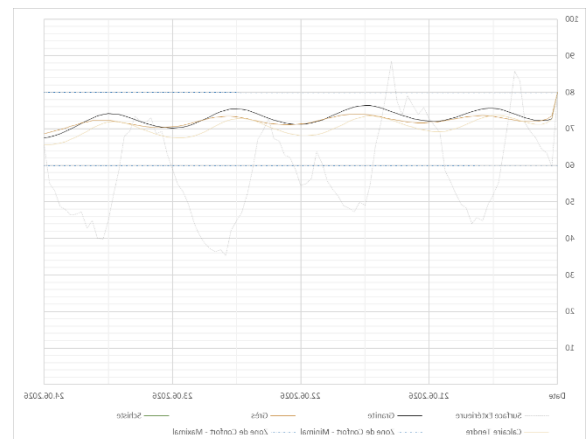
Annexe 7 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 10 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

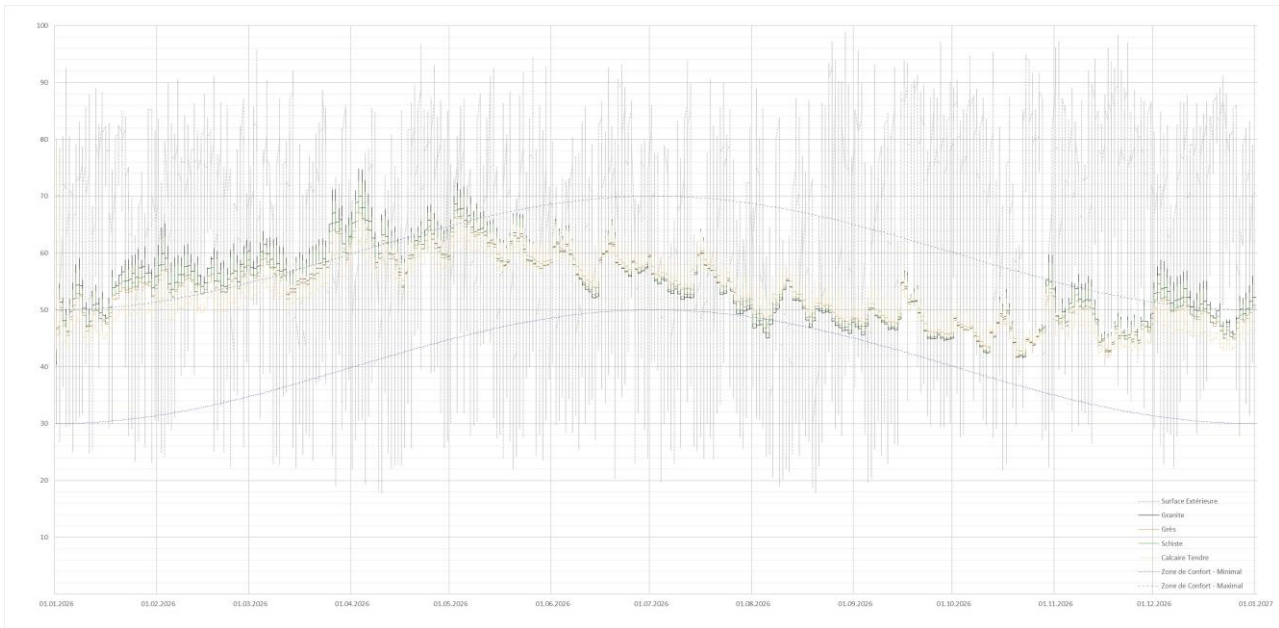


Annexe 6 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

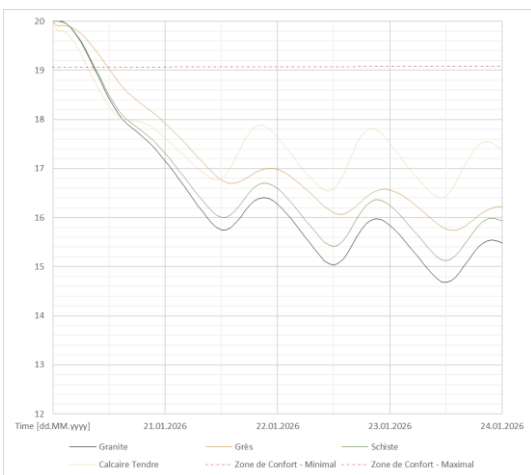


Annexe 9 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

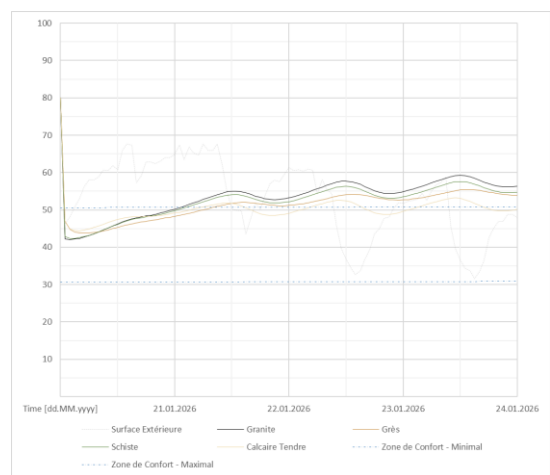
Types de pierres – Zone Sud-Est



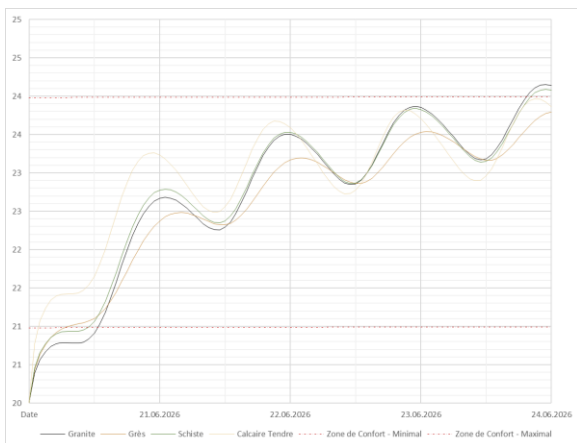
Annexe 14 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



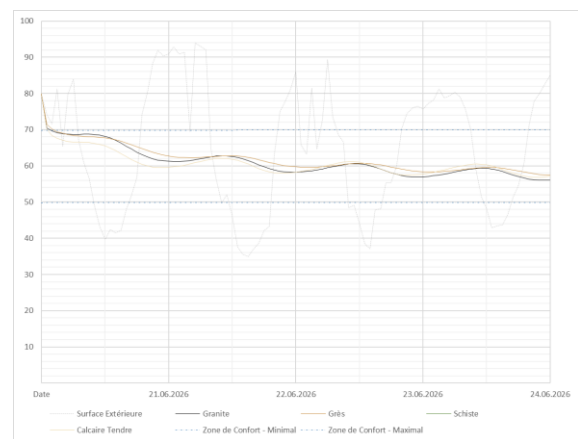
Annexe 12 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 13 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

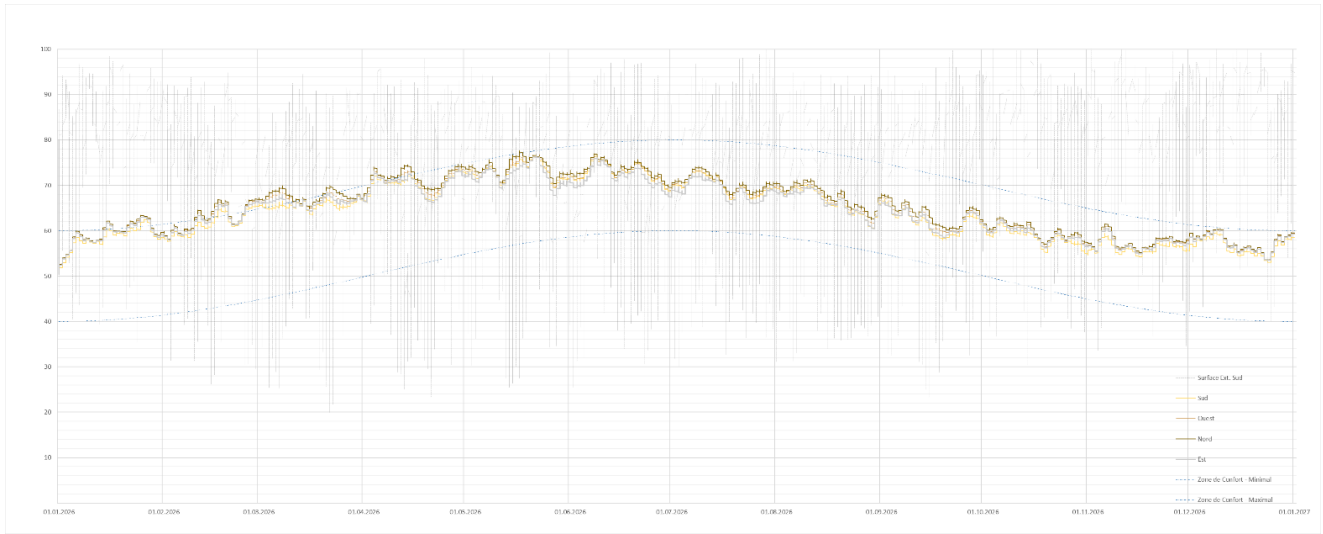


Annexe 11 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

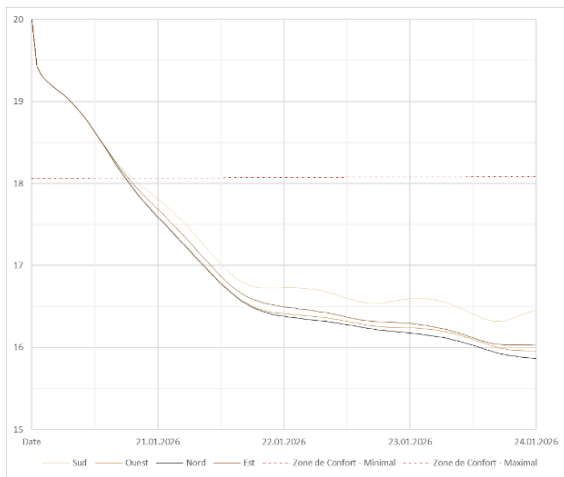


Annexe 15 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

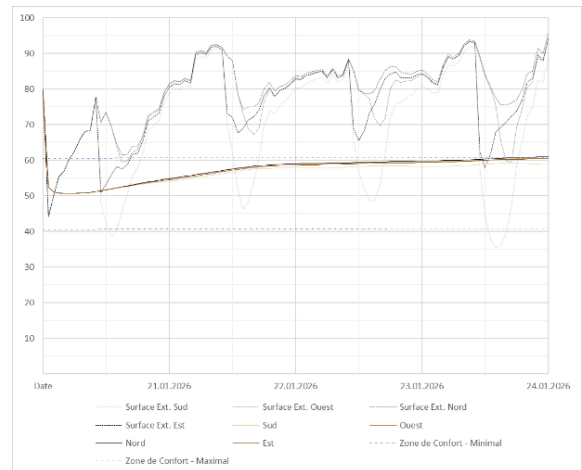
Orientation mur - Zone Nord-Ouest



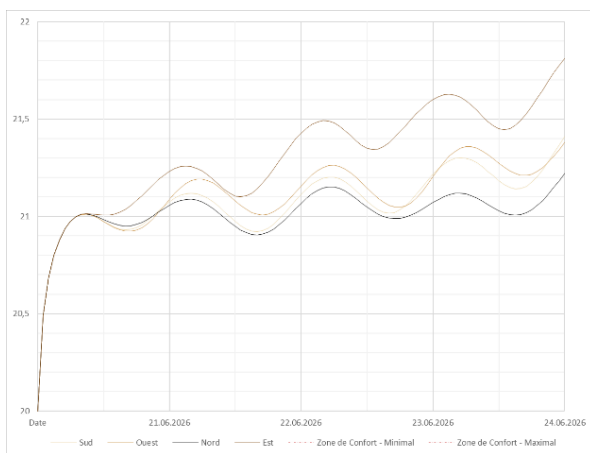
Annexe 19 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



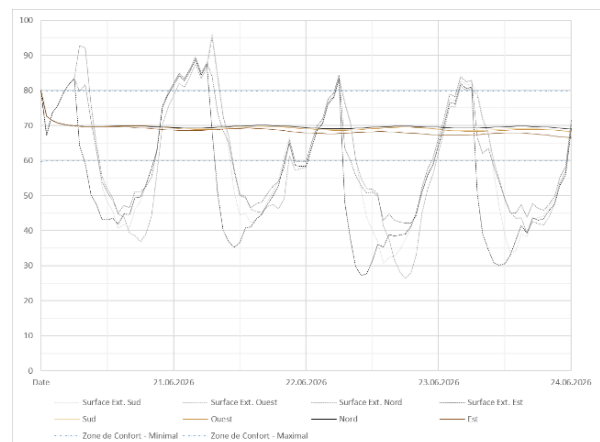
Annexe 18 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 17 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

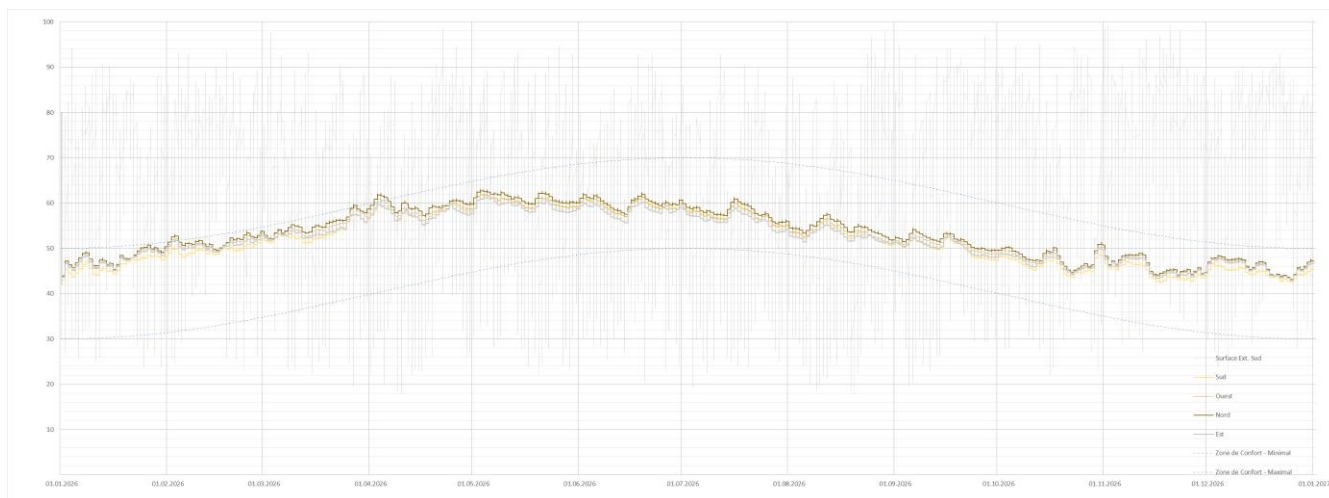


Annexe 16 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

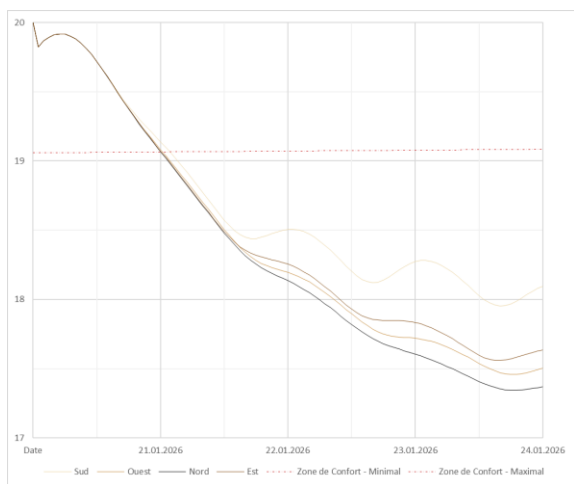


Annexe 20 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

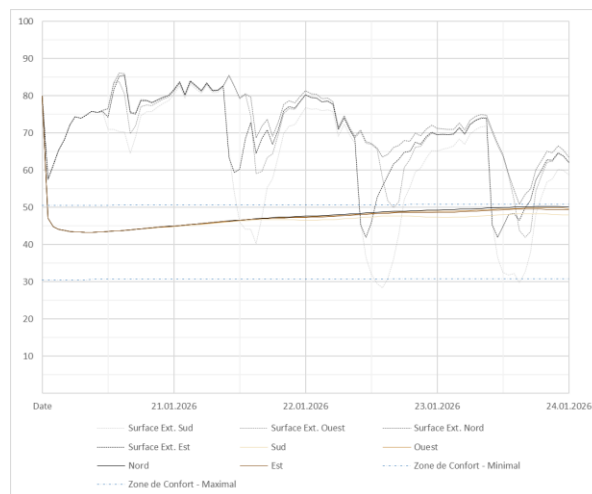
Orientation mur - Zone Sud-Est



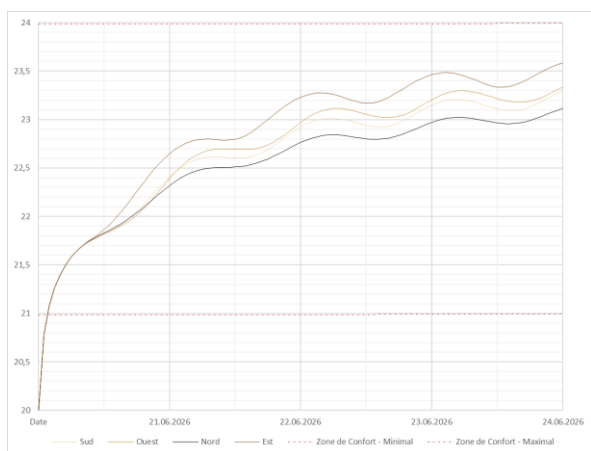
Annexe 23 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



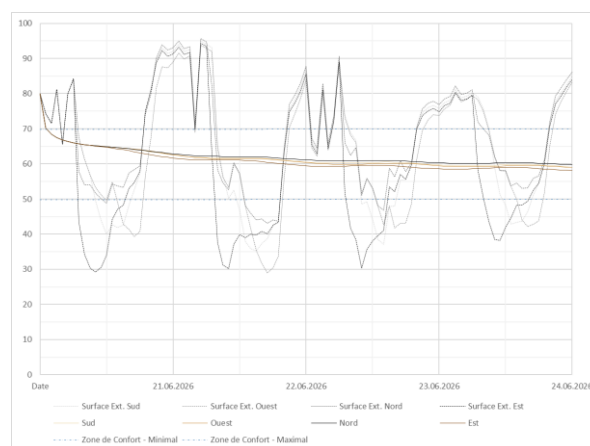
Annexe 22 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 25 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

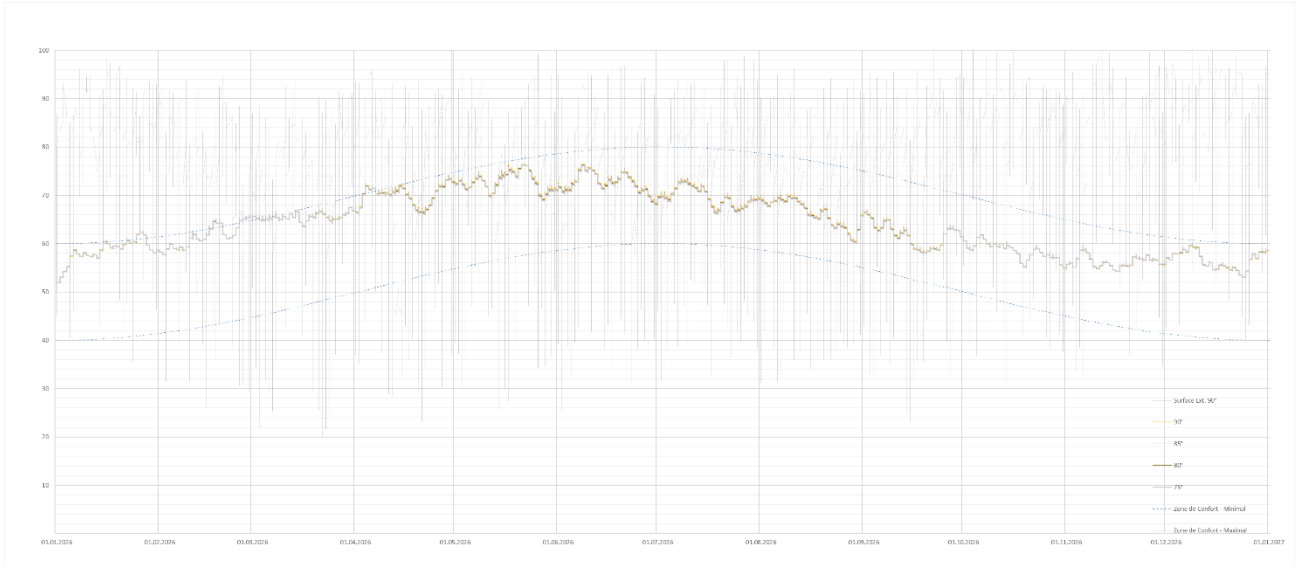


Annexe 21 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

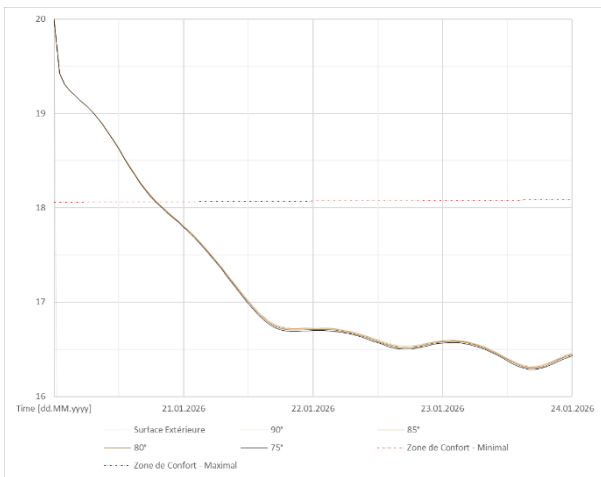


Annexe 24 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes orientations sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

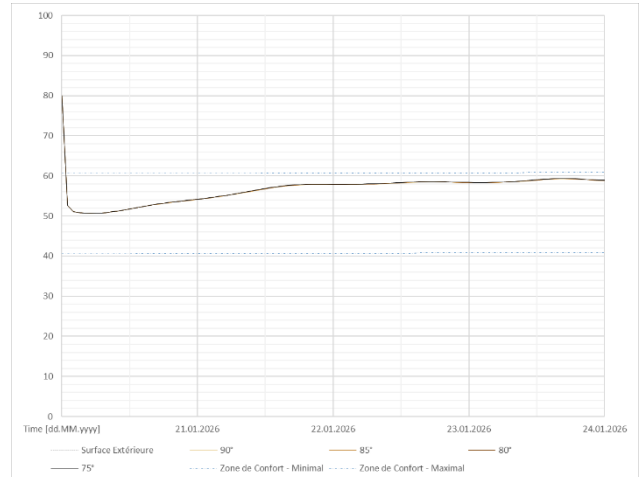
Fruit du mur – Zone Nord-Ouest



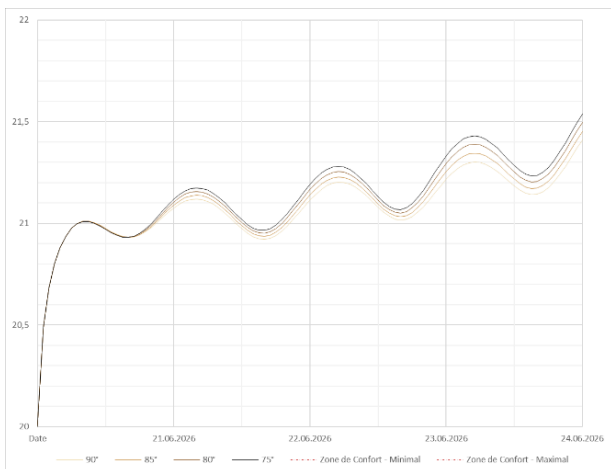
Annexe 30 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



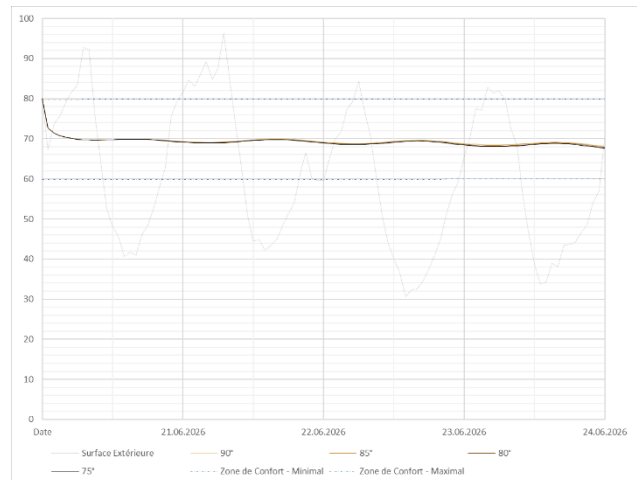
Annexe 29 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 27 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

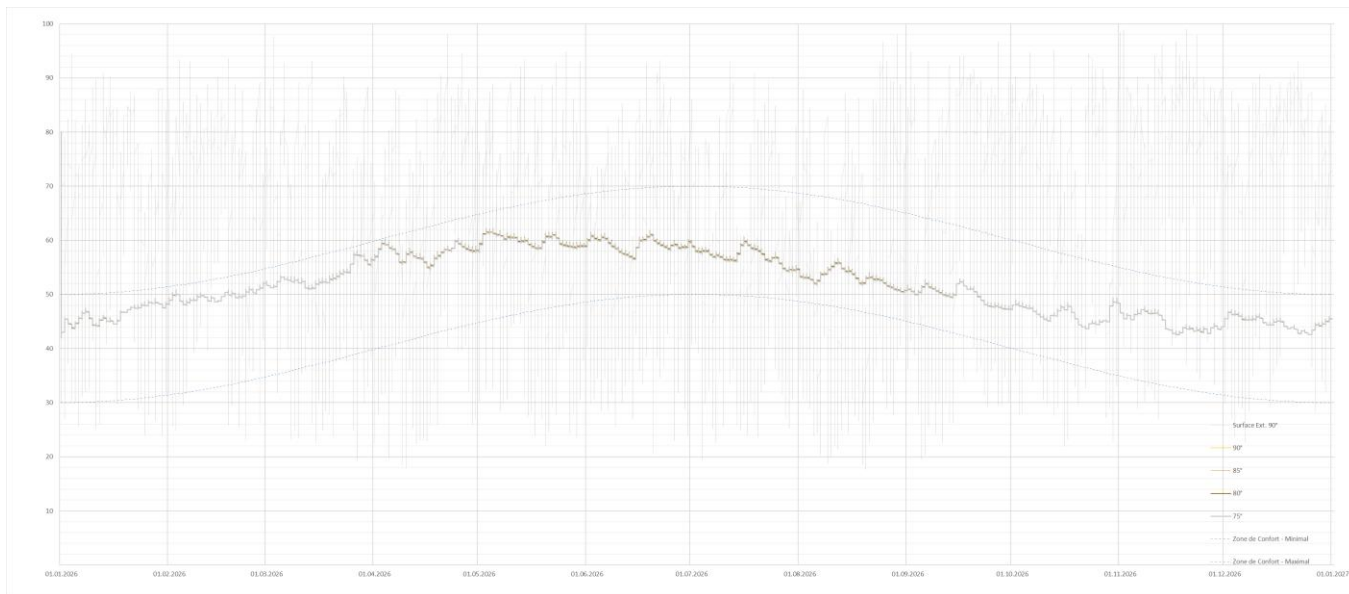


Annexe 28 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

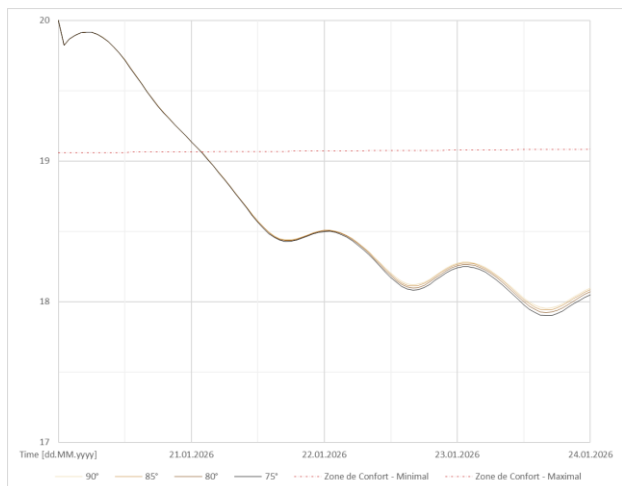


Annexe 26 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

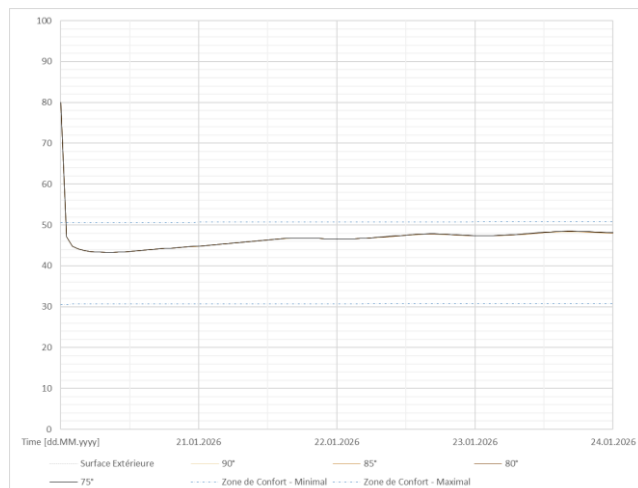
Fruit du mur – Zone Sud-Est



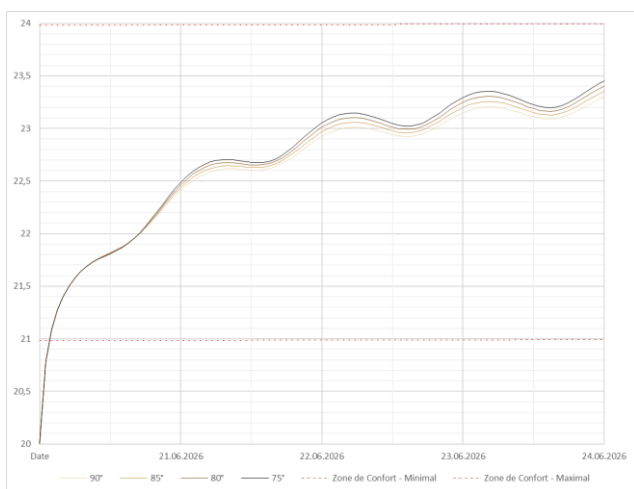
Annexe 33 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



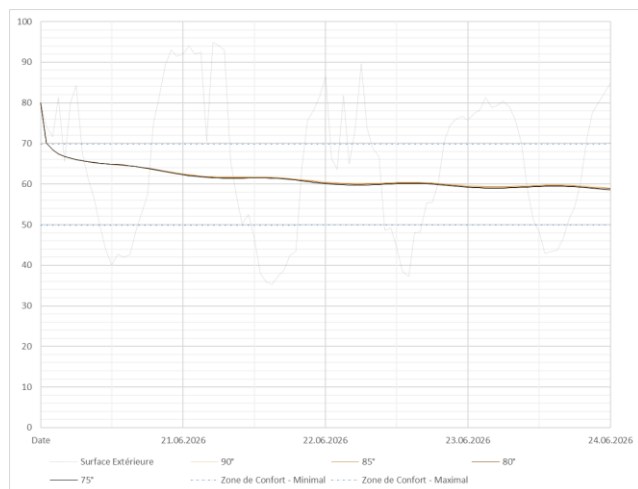
Annexe 32 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 35 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

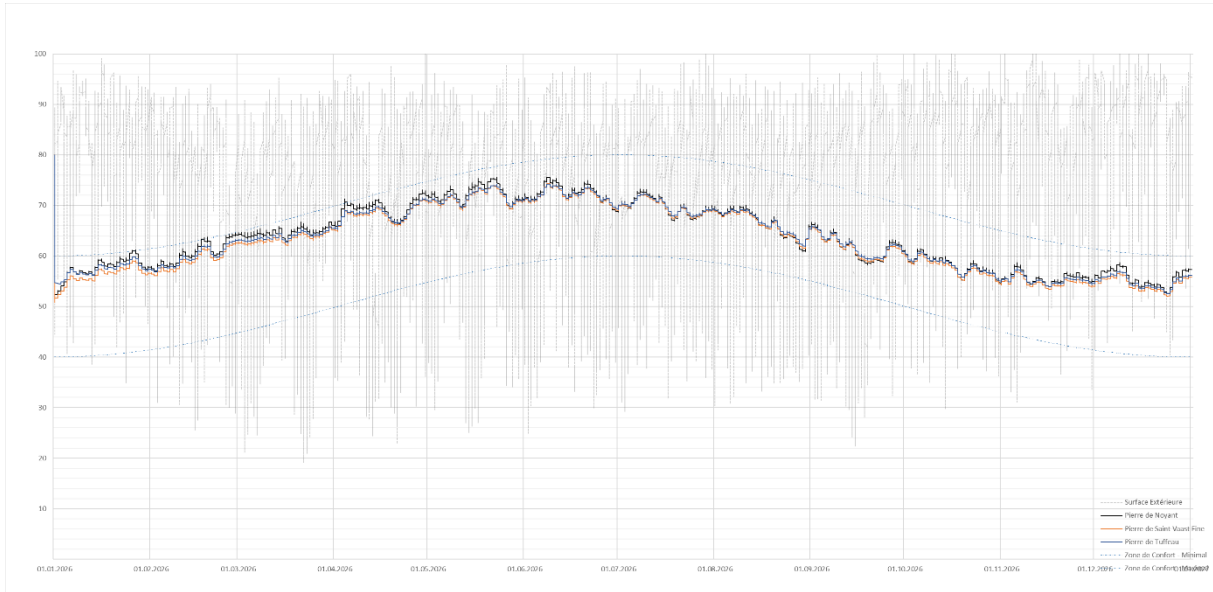


Annexe 31 : Évolution de la température de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

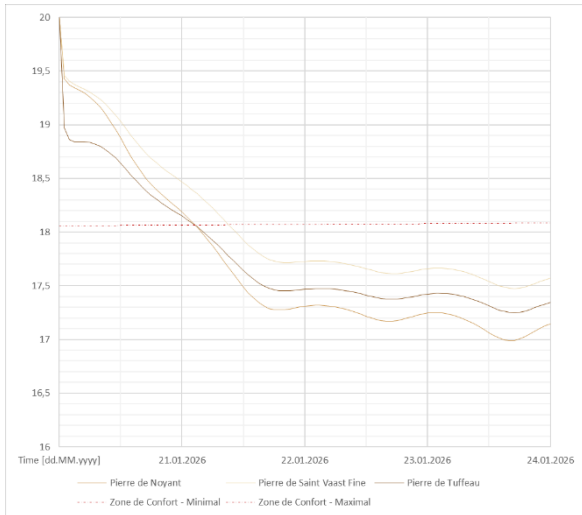


Annexe 34 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différents fruits sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

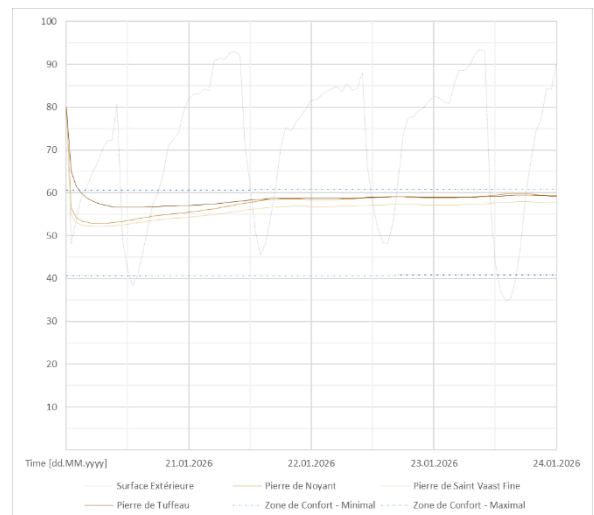
Pierre calcaire – Zone Nord-Ouest



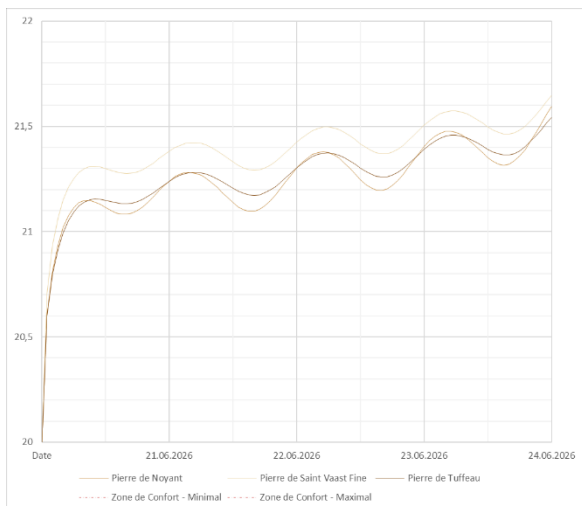
Annexe 38 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



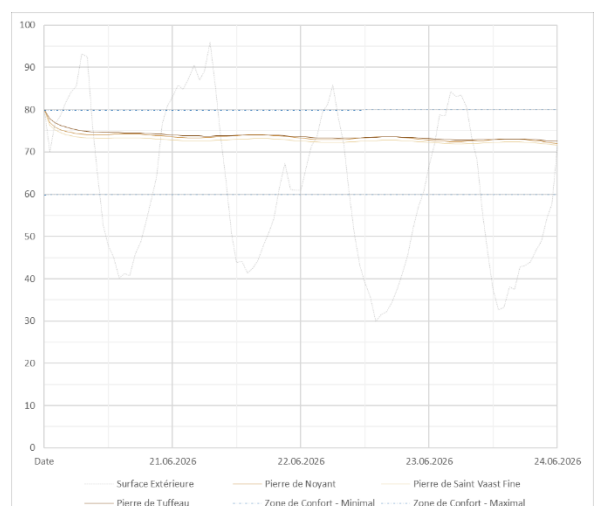
Annexe 36 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 40 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

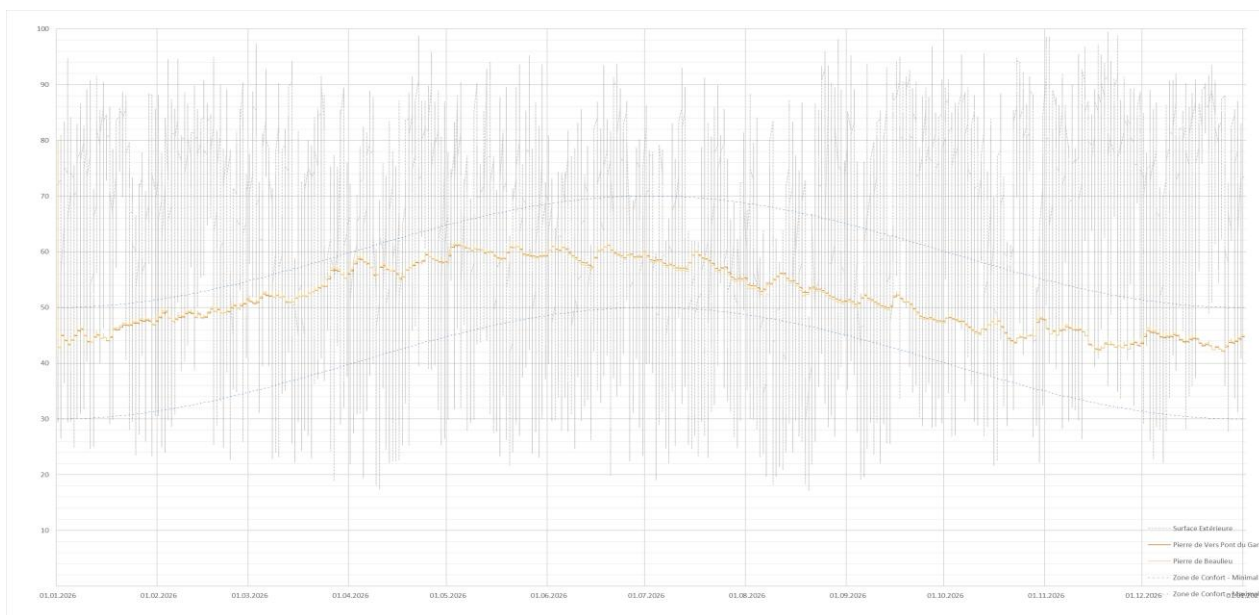


Annexe 37 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

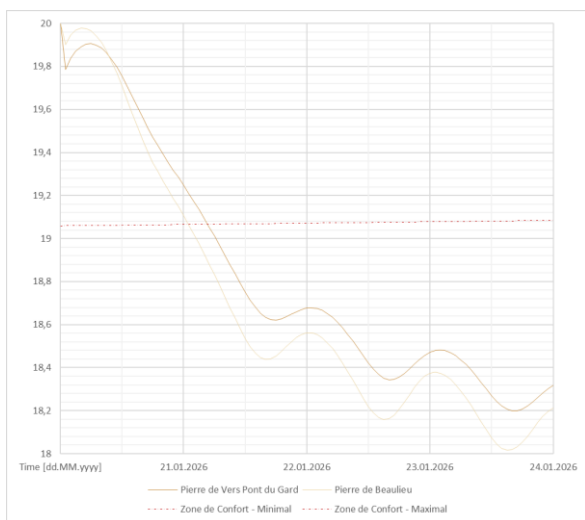


Annexe 39 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

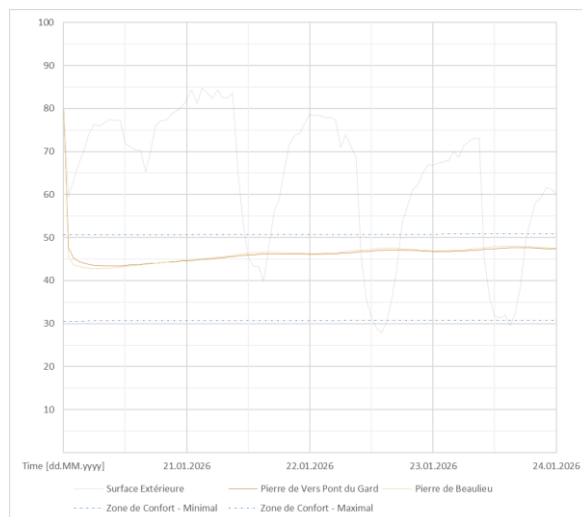
Pierre calcaire – Zone Sud-Est



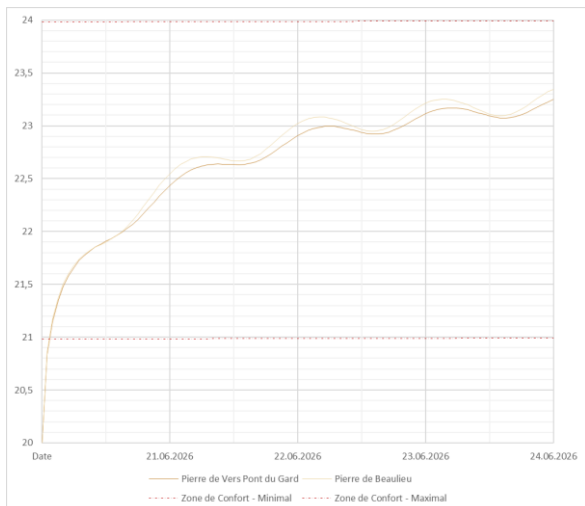
Annexe 43 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



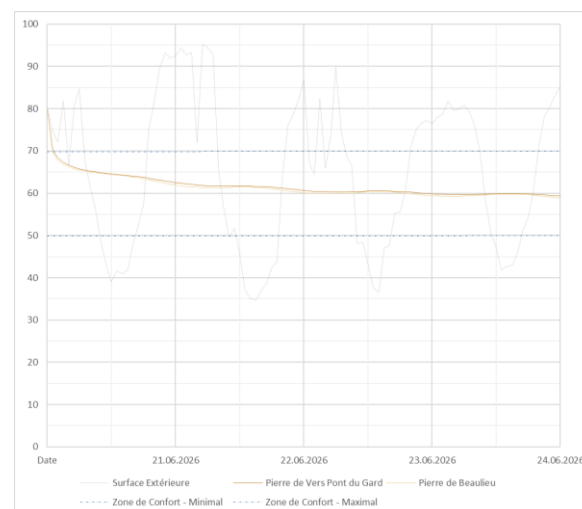
Annexe 42 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 45 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

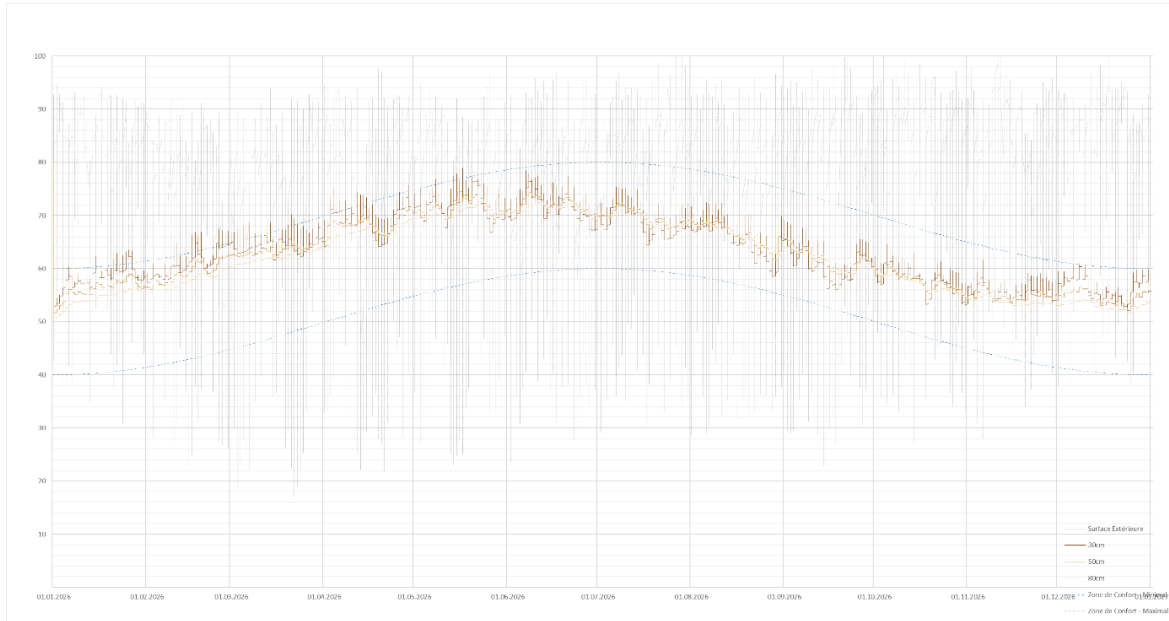


Annexe 41 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

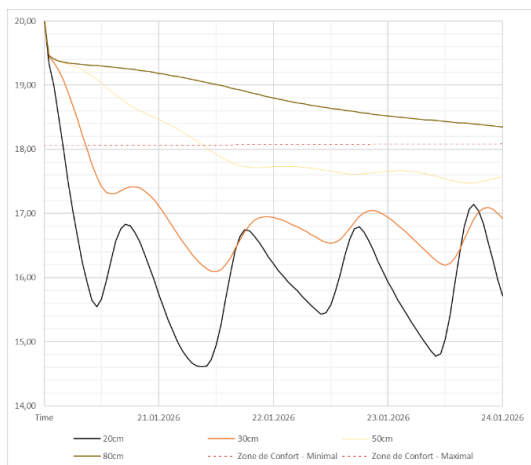


Annexe 44 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes pierres sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

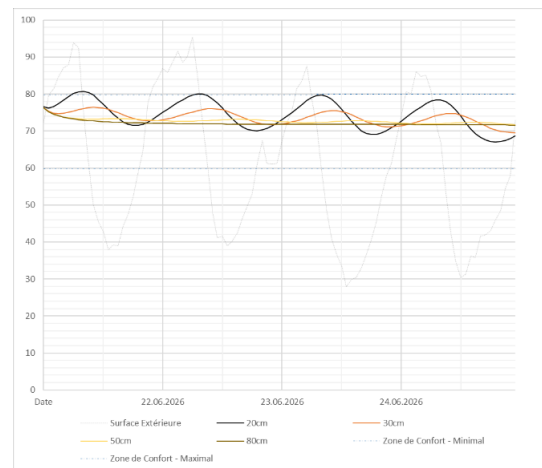
Épaisseur pierre – Zone Nord-Ouest



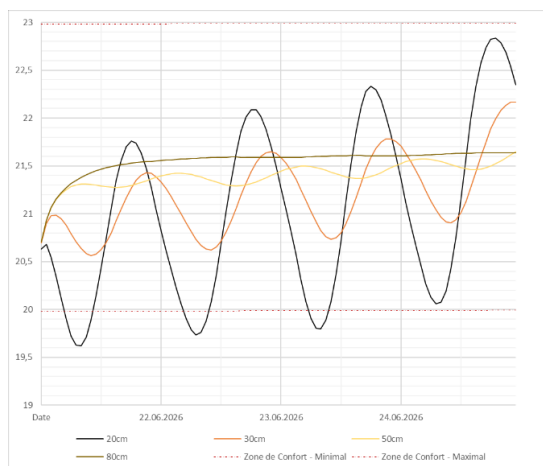
Annexe 48 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



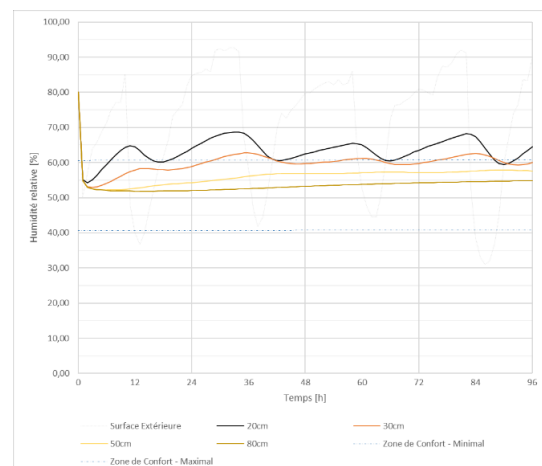
Annexe 46 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 50 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

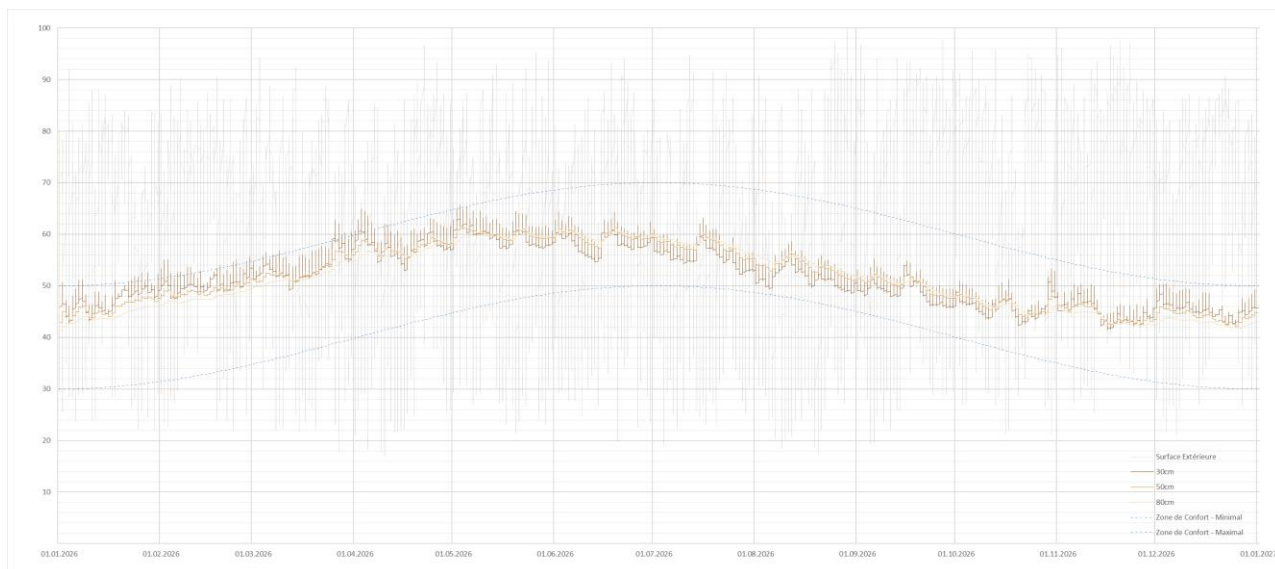


Annexe 47 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

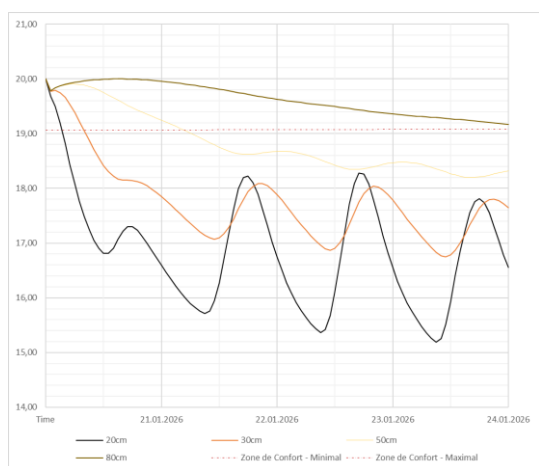


Annexe 49 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

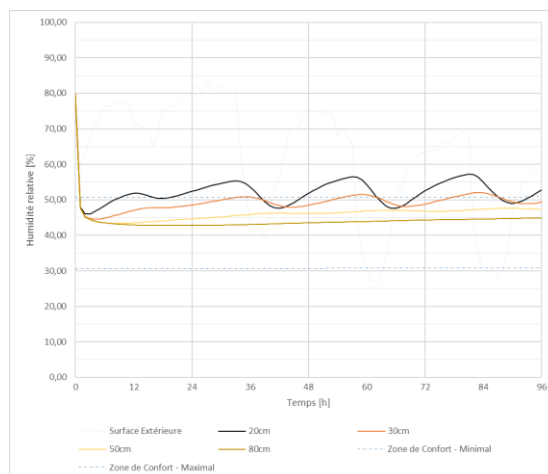
Épaisseur pierre – Zone Sud-Est



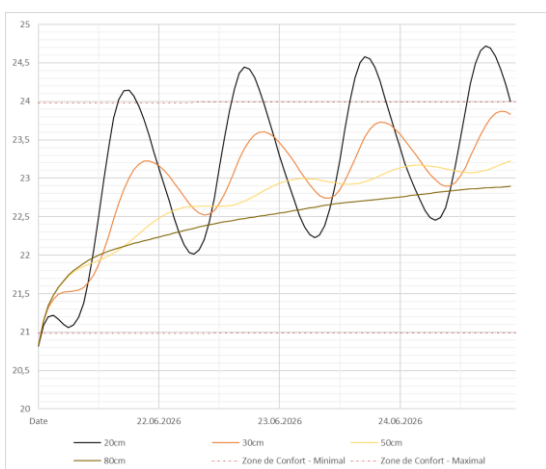
Annexe 54 : Évolution de l’humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



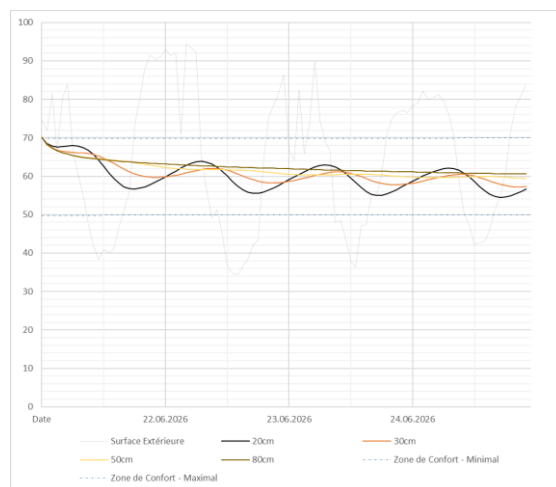
Annexe 52 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 55 : Évolution de l’humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

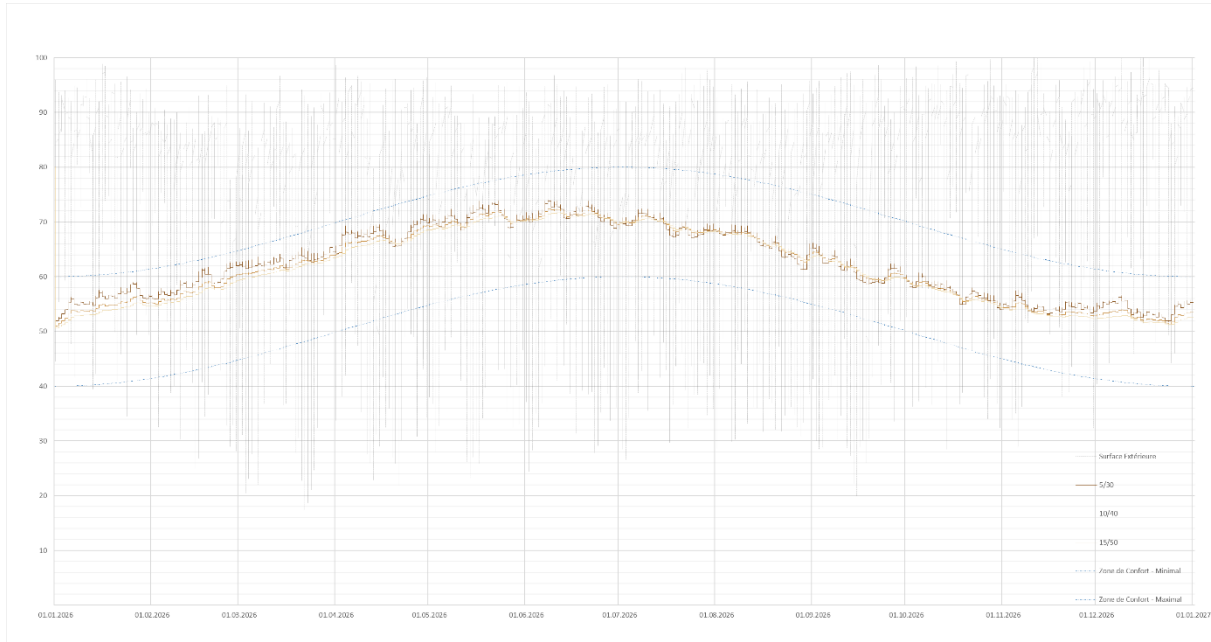


Annexe 53 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

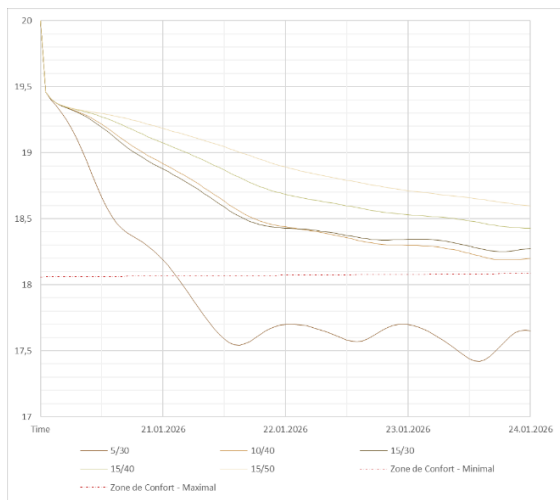


Annexe 51 : Évolution de l’humidité de la surface intérieure de différentes épaisseurs sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

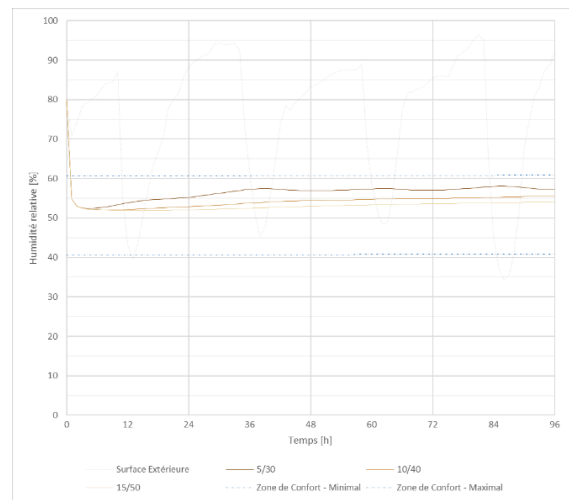
Isolation extérieure – Zone Nord-Ouest



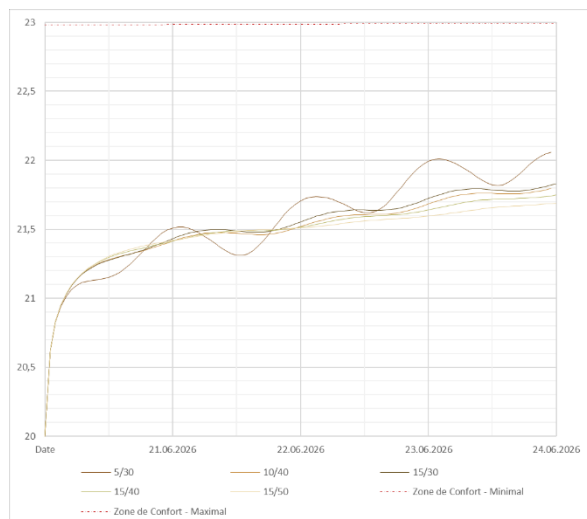
Annexe 59 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



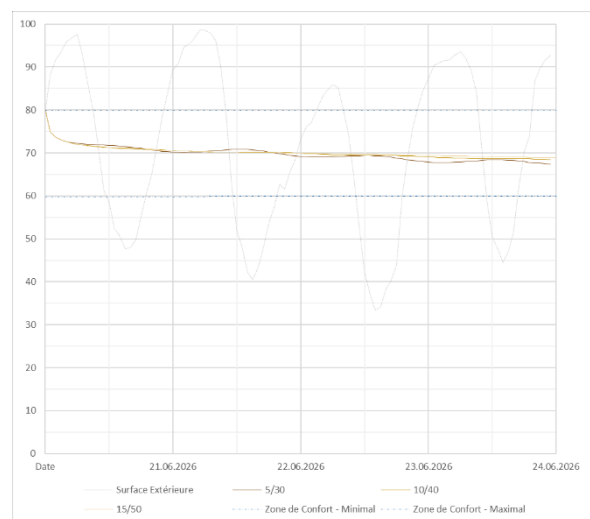
Annexe 57 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 58 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

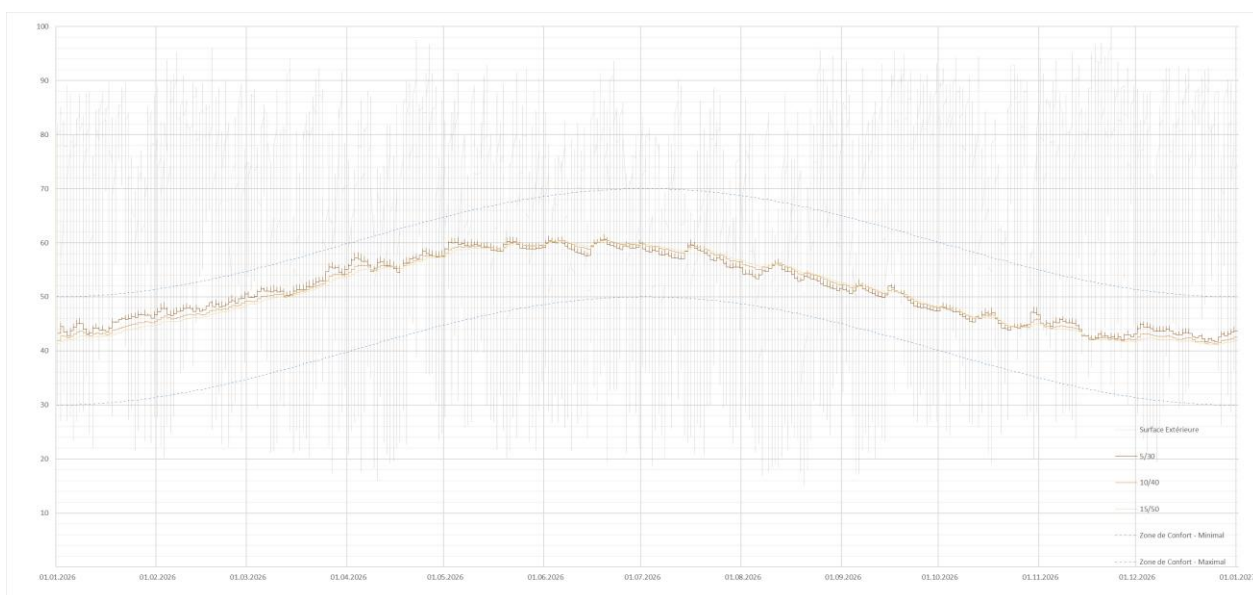


Annexe 56 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

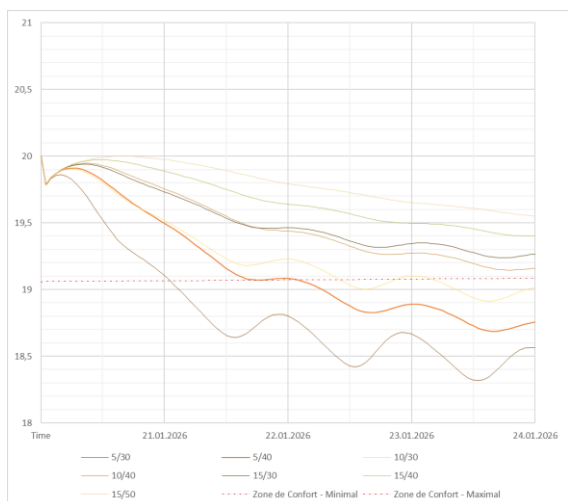


Annexe 60 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

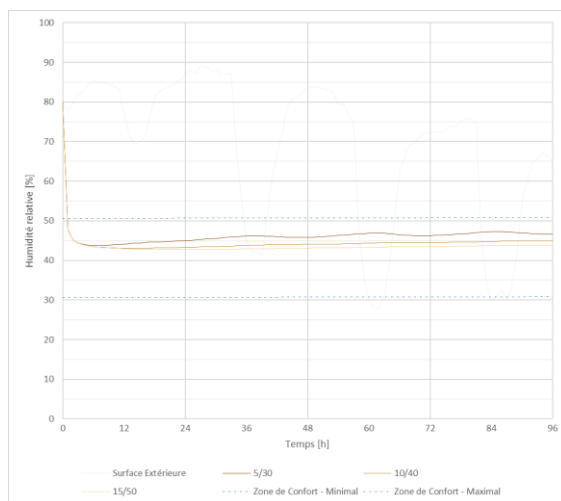
Isolation extérieure : Zone Sud-Est



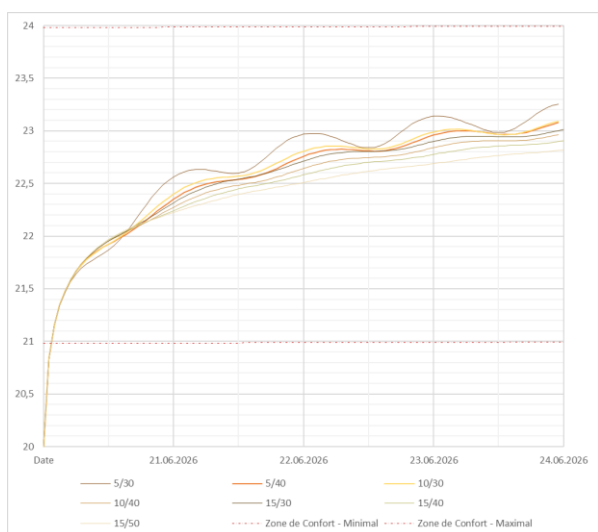
Annexe 64 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



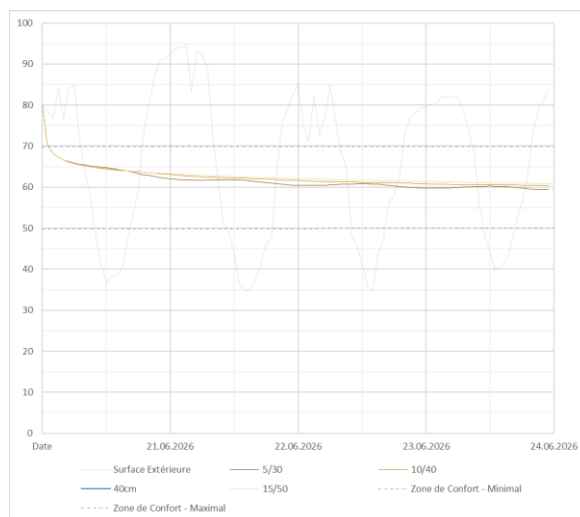
Annexe 63 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 65 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

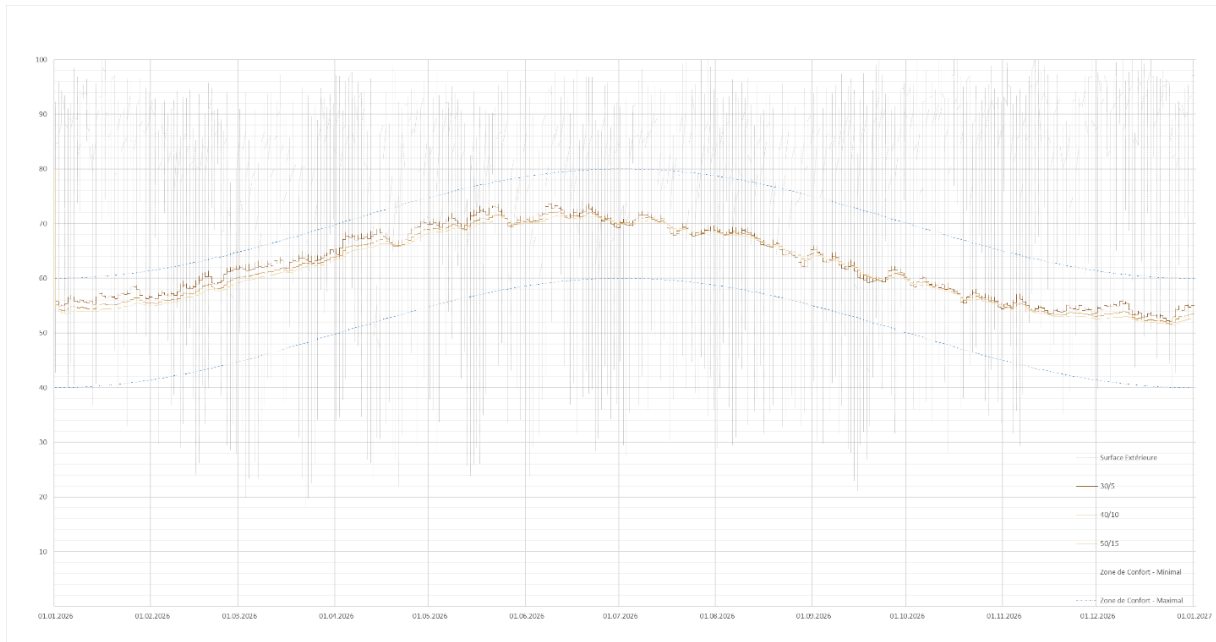


Annexe 61 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

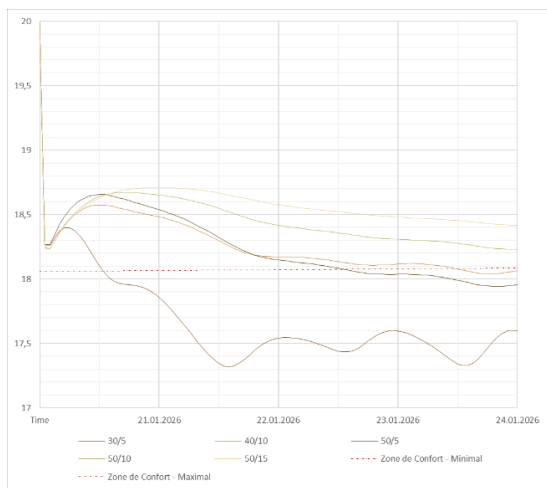


Annexe 62 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

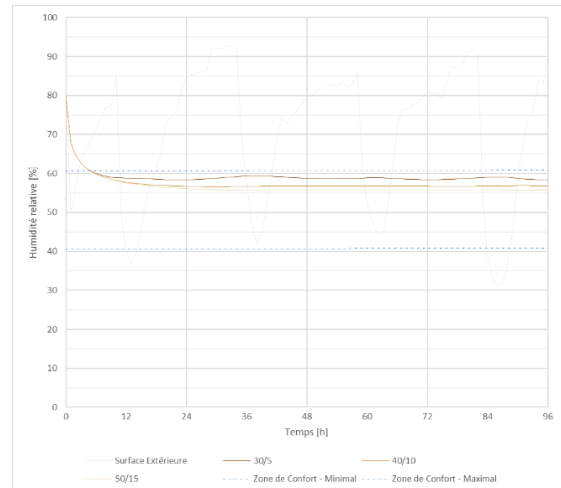
Isolation intérieure – Zone Nord-Ouest



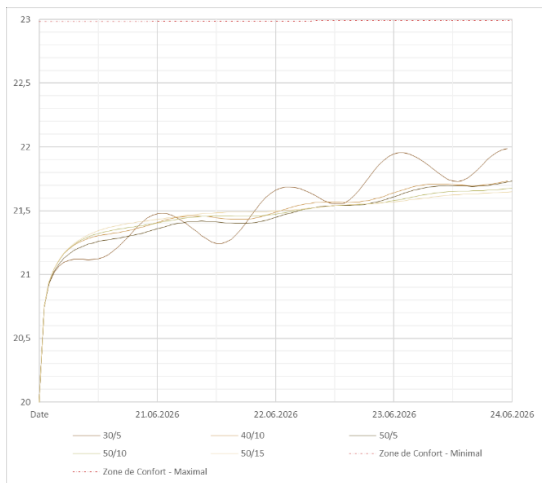
Annexe 69 : Évolution de l’humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



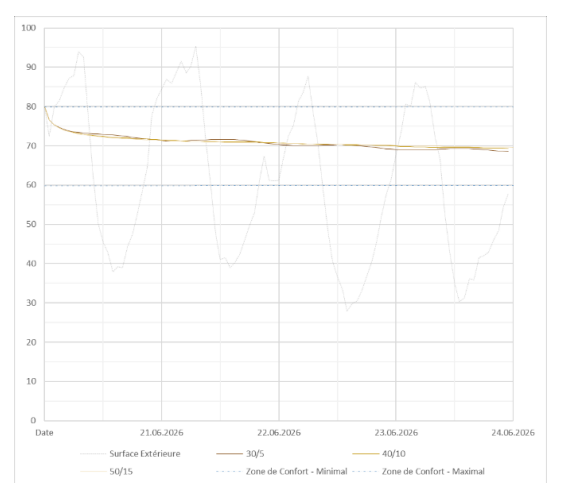
Annexe 68 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 67 : Évolution de l’humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

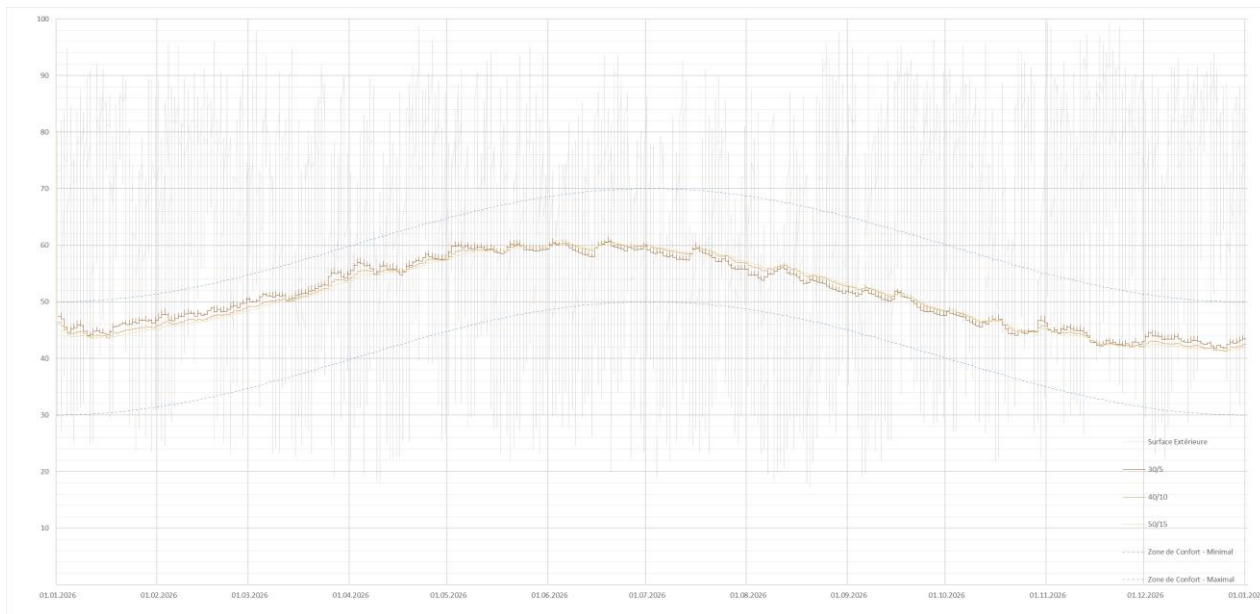


Annexe 66 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

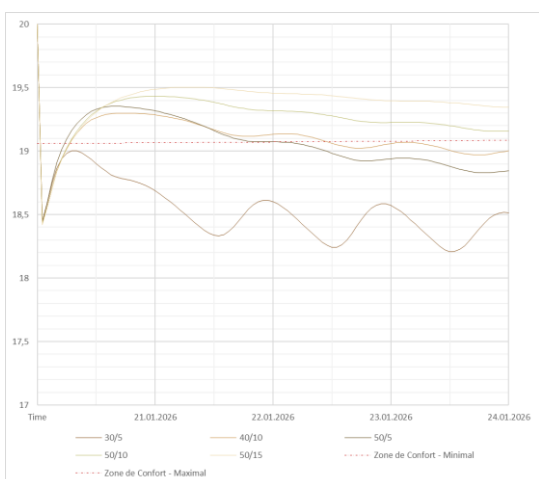


Annexe 70 : Évolution de l’humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

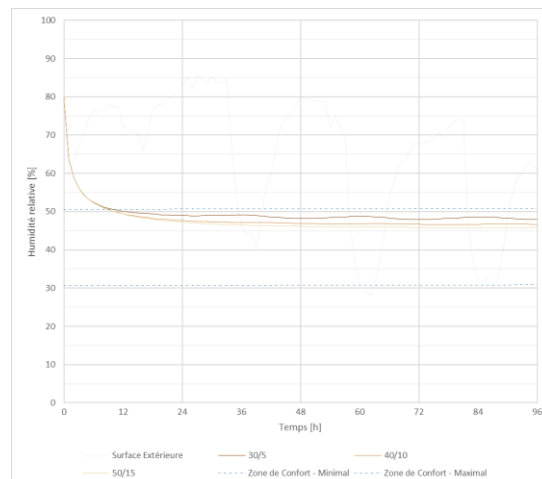
Isolation intérieure – Zone Sud-Est



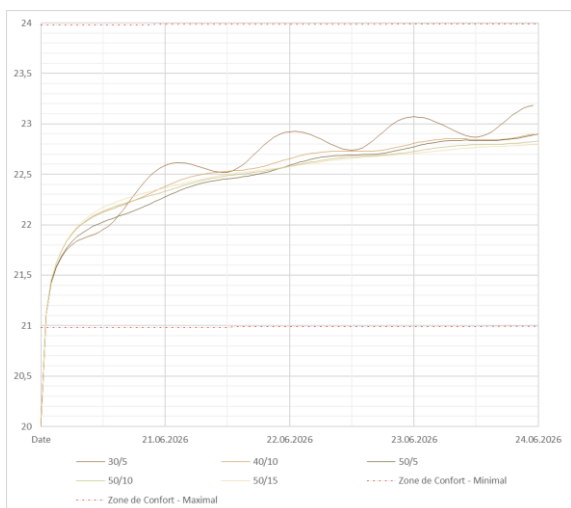
Annexe 74 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



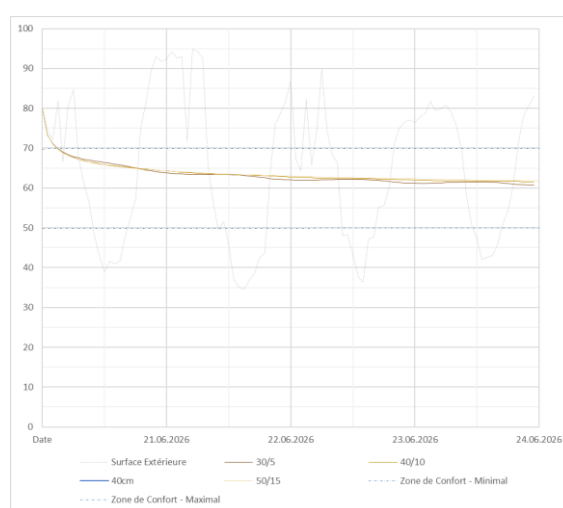
Annexe 73 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 75 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

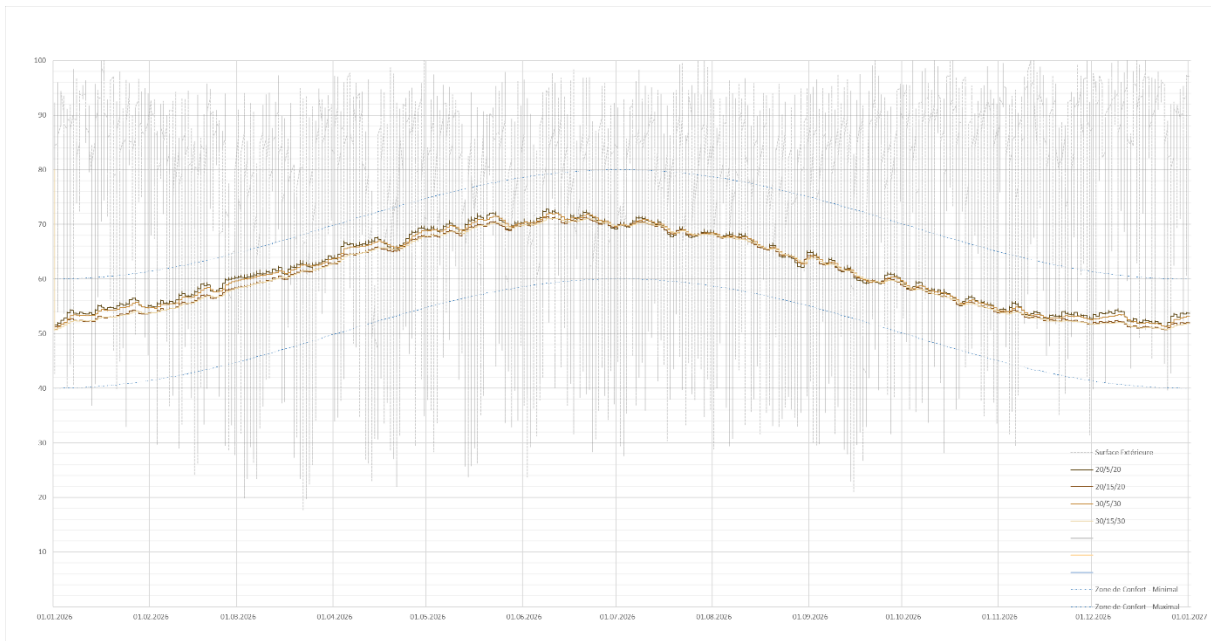


Annexe 72 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

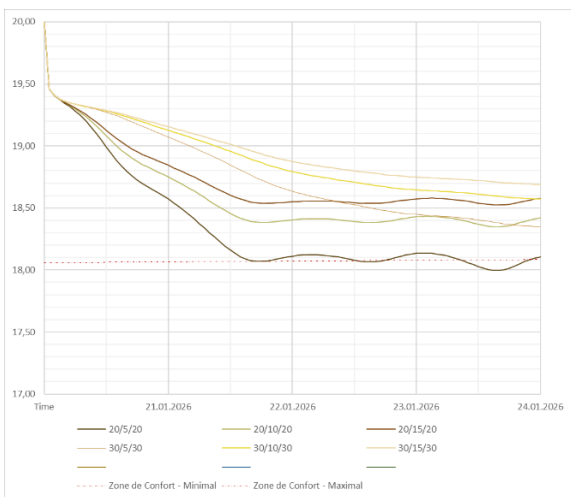


Annexe 71 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

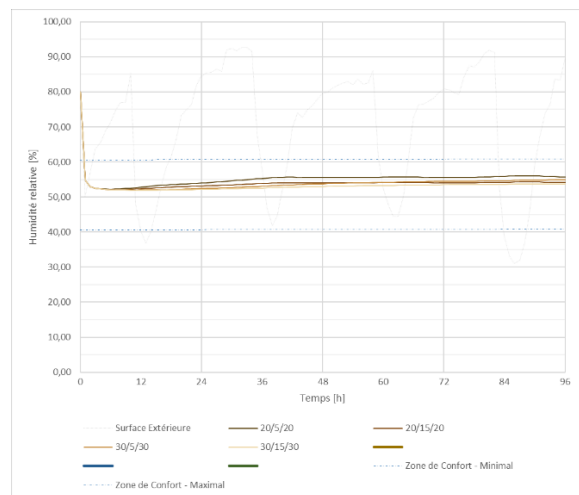
Mur double air – Zone Nord-Ouest



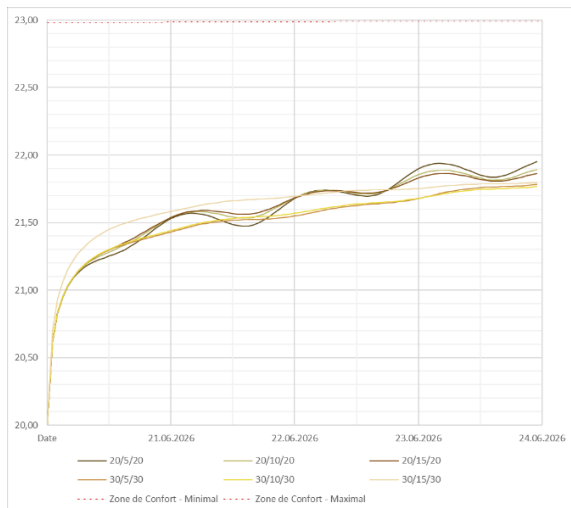
Annexe 76 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



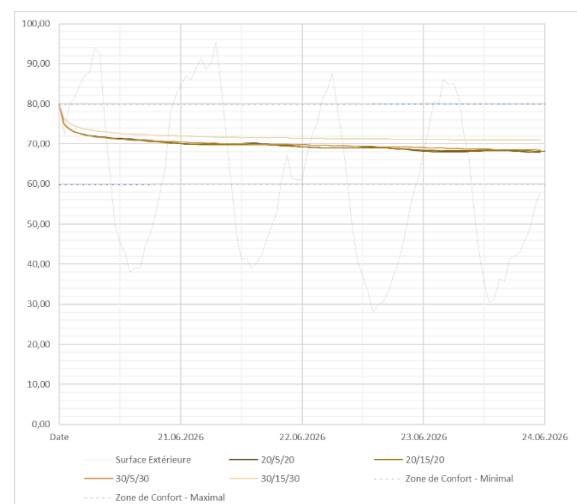
Annexe 78 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 80 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

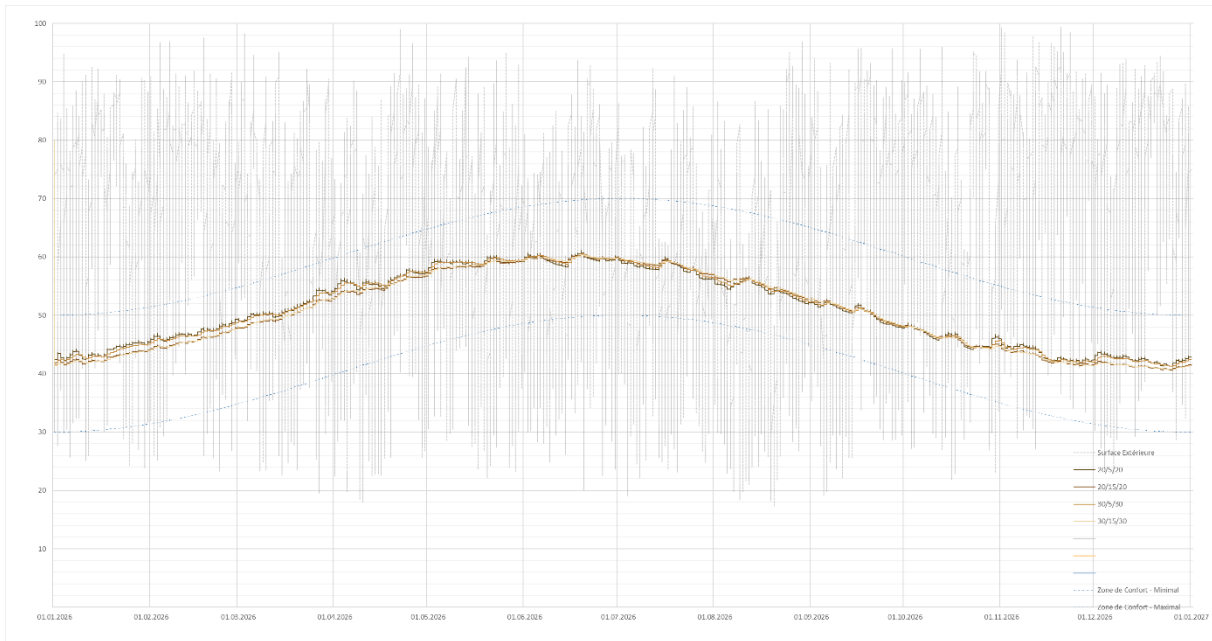


Annexe 77 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

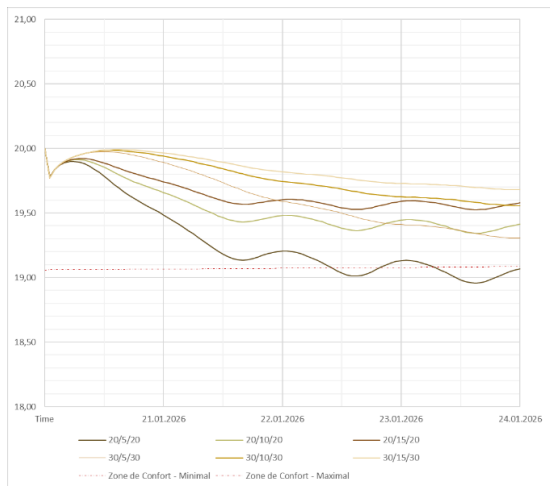


Annexe 79 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

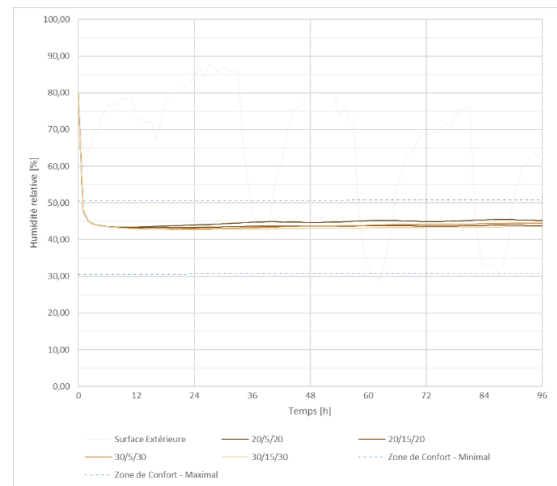
Mur double air – Zone Sud-Est



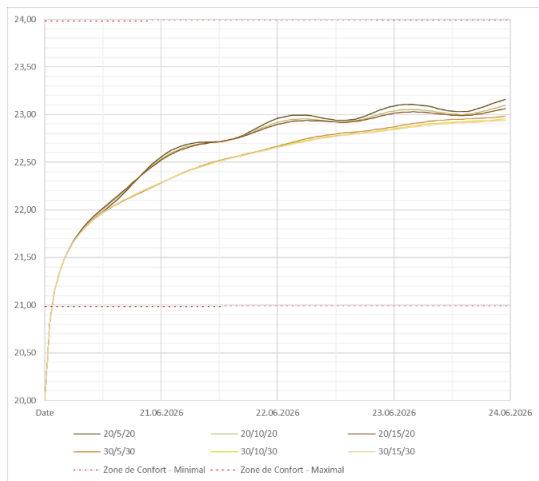
Annexe 83 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



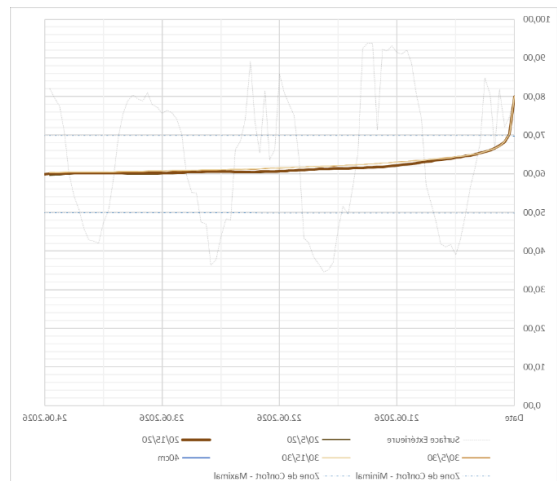
Annexe 82 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 85 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

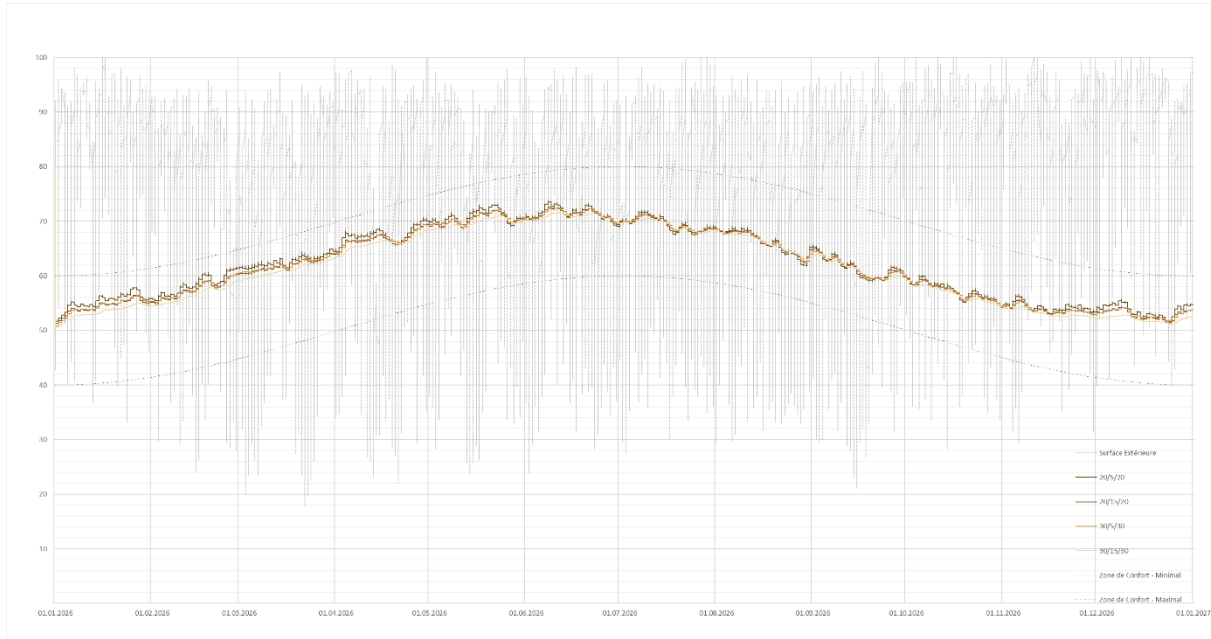


Annexe 81 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

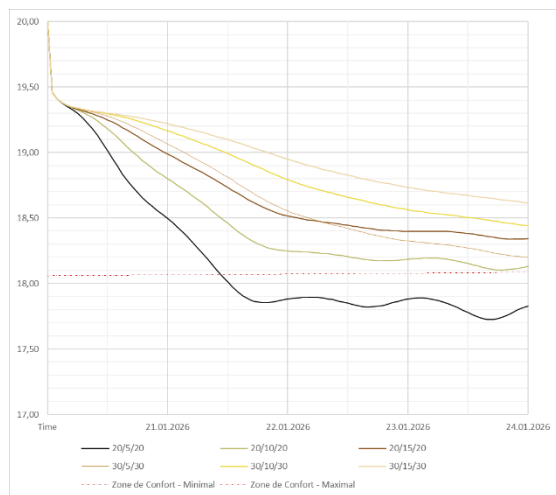


Annexe 84 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

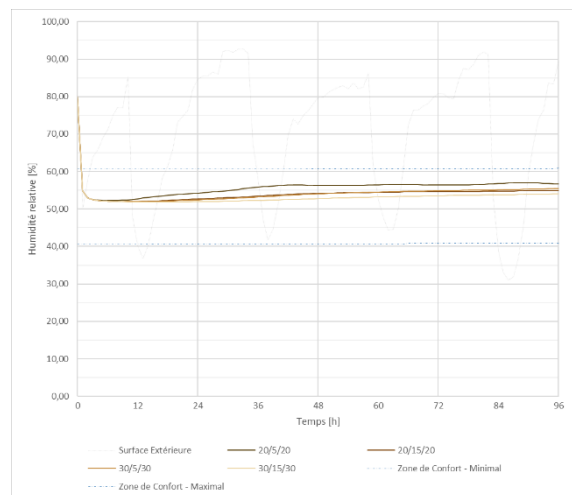
Mur double béton de chanvre – Zone Nord-Ouest



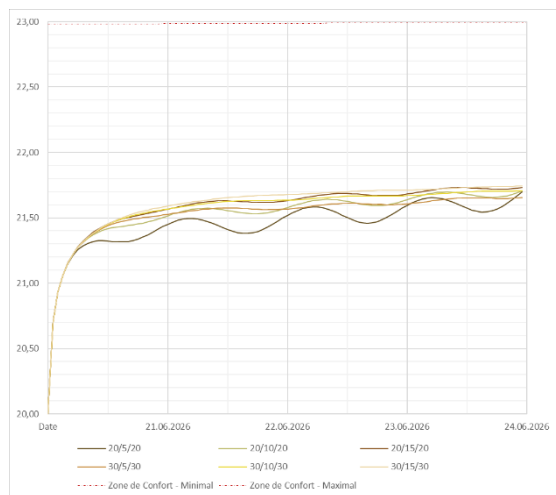
Annexe 89 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



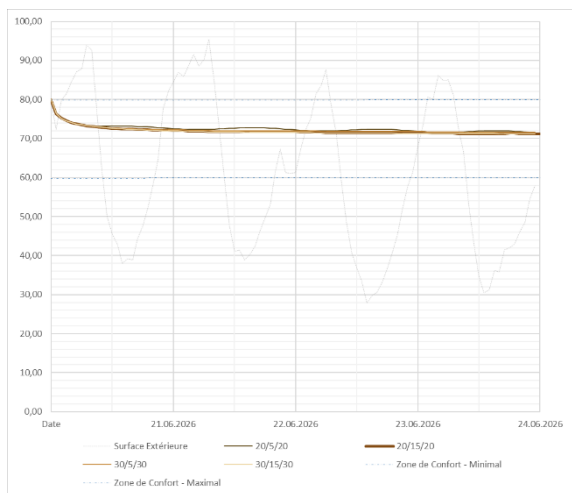
Annexe 88 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 87 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

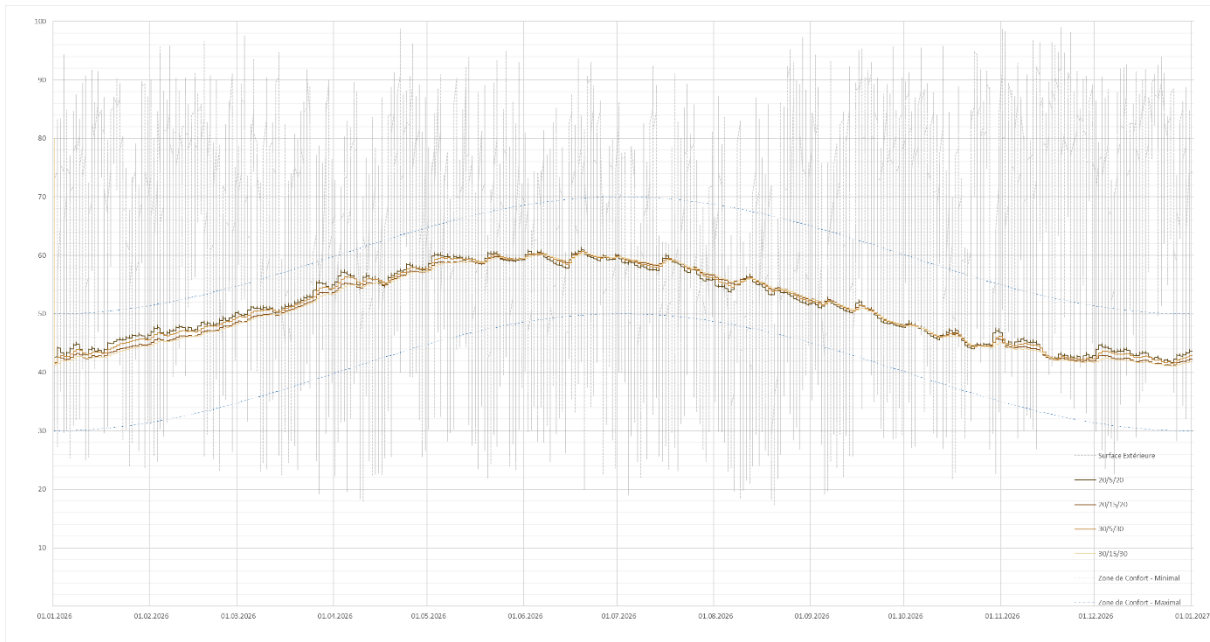


Annexe 86 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

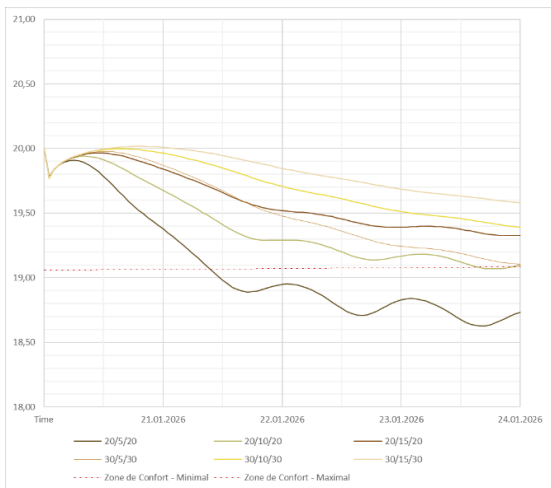


Annexe 90 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Rennes (Source : WUFI, Auteur)

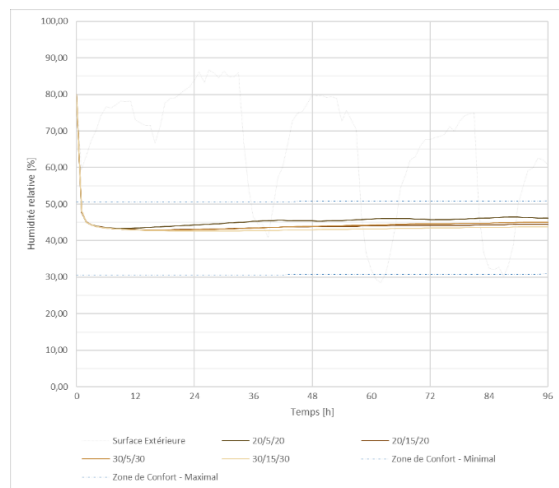
Mur double béton de chanvre – Zone Sud-Est



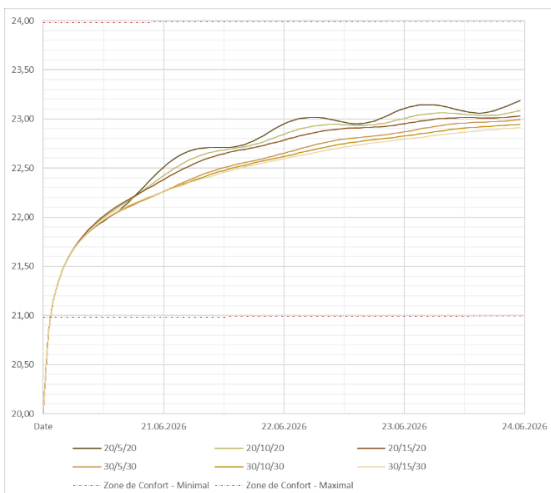
Annexe 94 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur une année entière à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



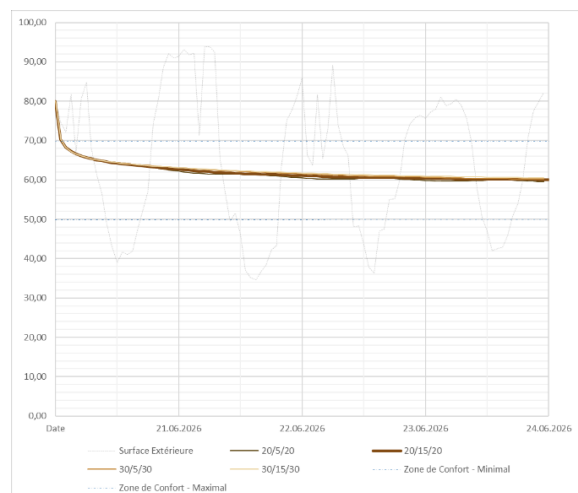
Annexe 93 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)



Annexe 92 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en hiver à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

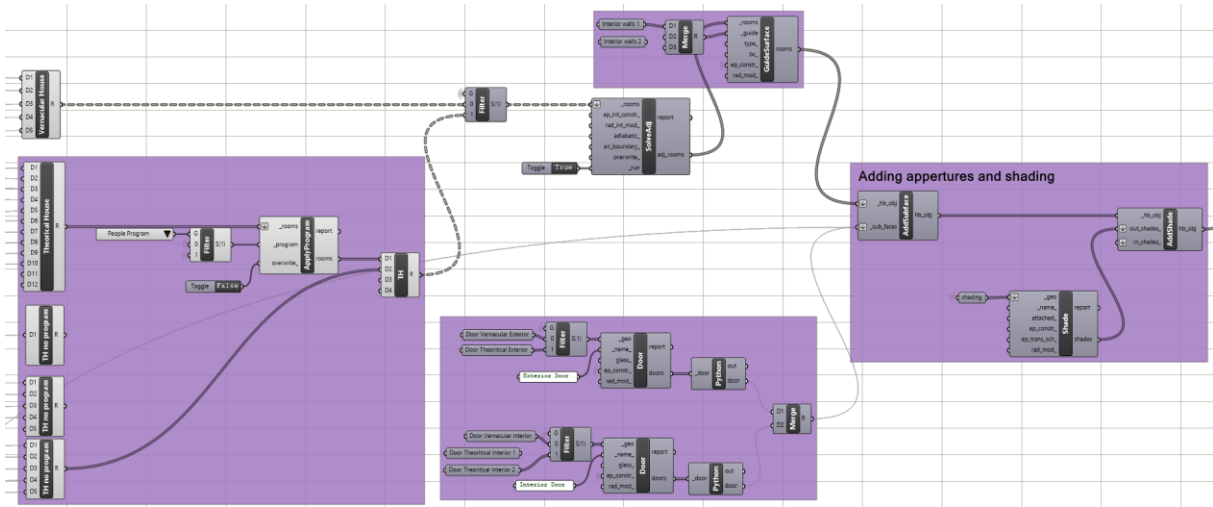


Annexe 91 : Évolution de la température de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

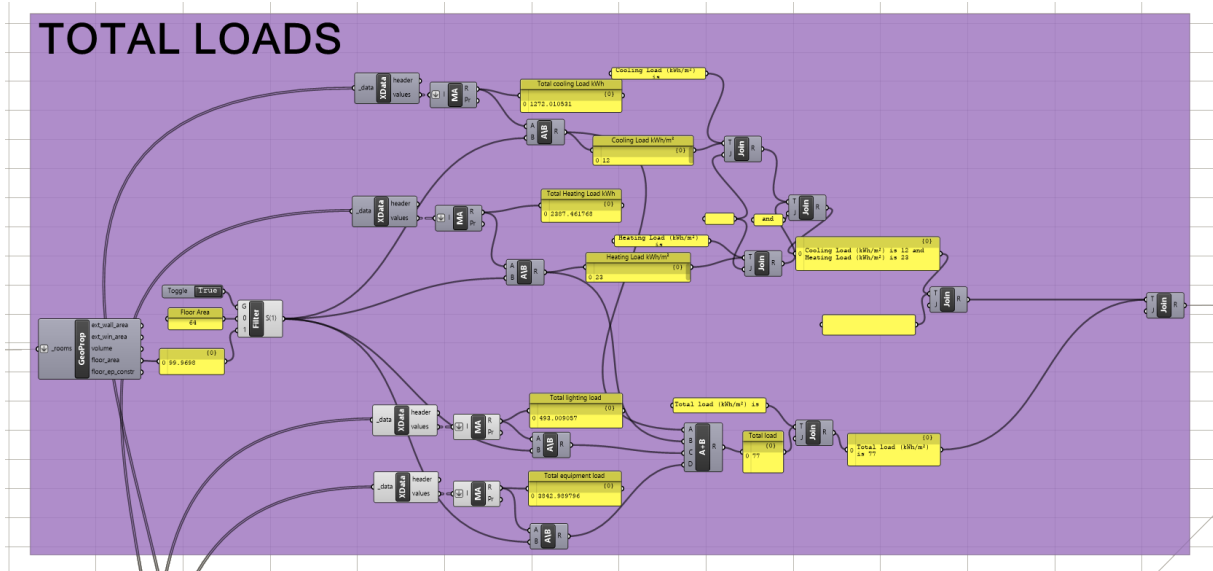


Annexe 95 : Évolution de l'humidité de la surface intérieure de différentes combinaisons sur 96h en été à Marseille (Source : WUFI, Auteur)

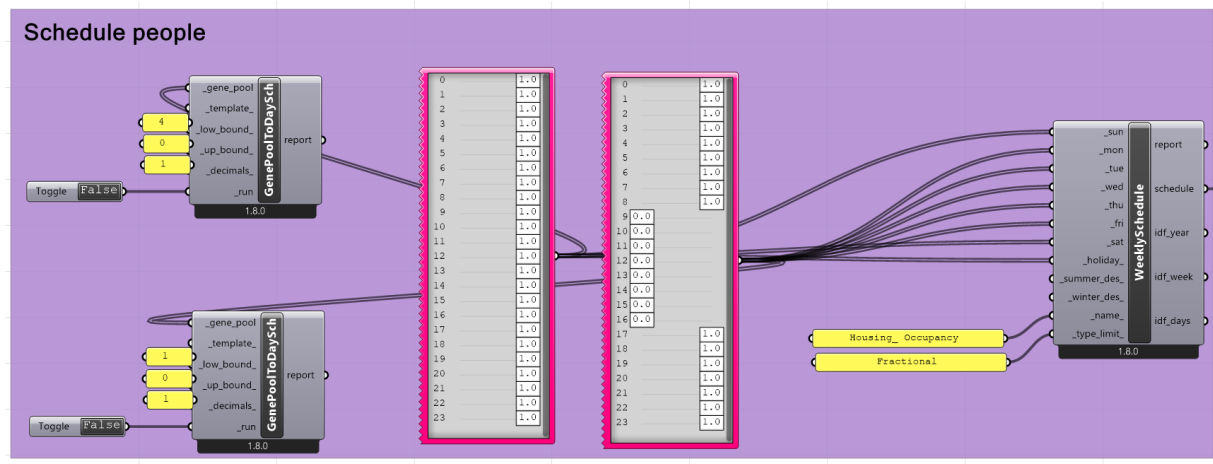
Éléments complémentaires du script Grasshopper des STD :



Annexe 98 : Assemblage des pièces HoneyBee pour créer un modèle complet (Source : Auteur)

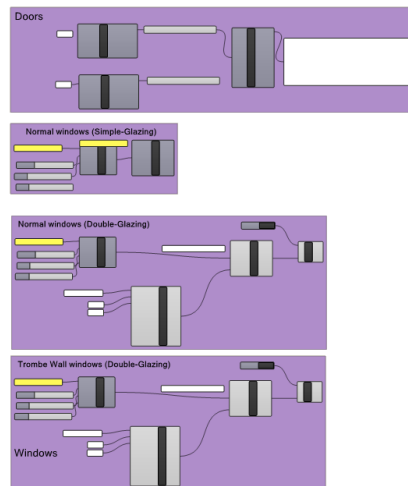


Annexe 97 : Compilation paramétrique des besoins estimés pour le chauffage et le refroidissement en une phrase complète affichée en titre de graphique (Source : Auteur)

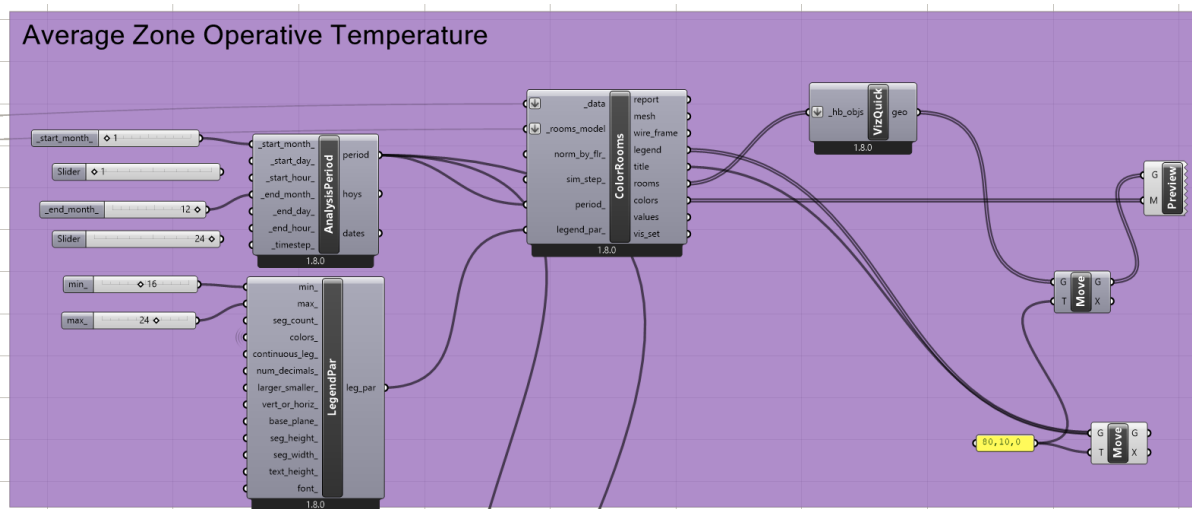


Annexe 96 : Taux de présence défini pour les usagers dans la définition du programme (Source : Auteur)

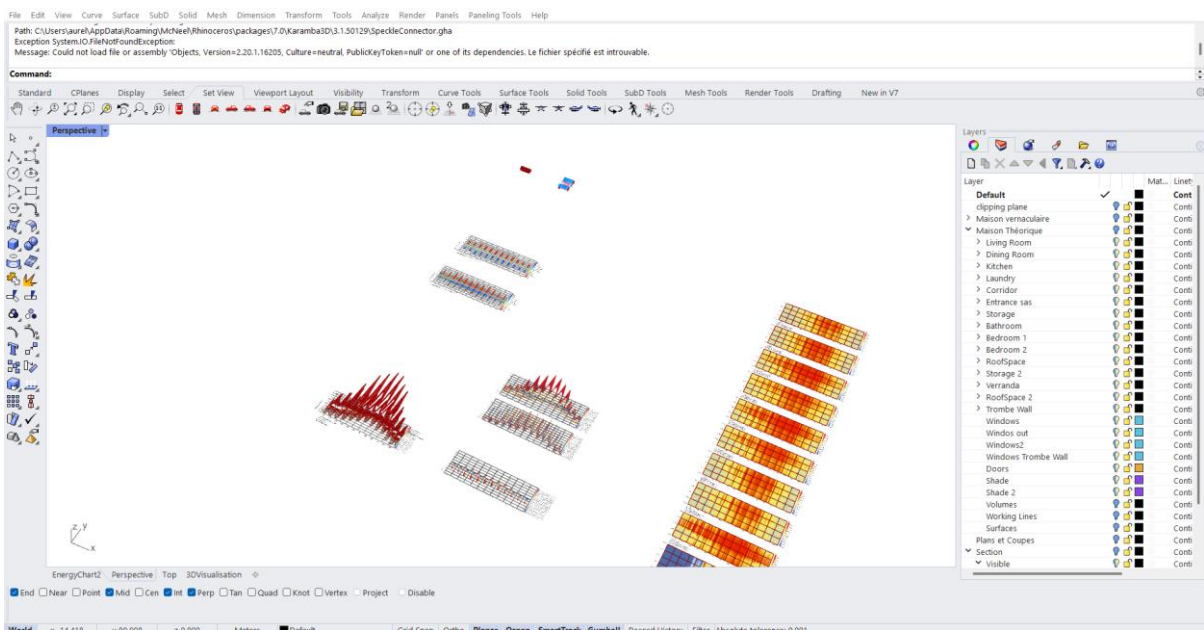
APERTURES CONSTRUCTION



Annexe 101 : Création des éléments de constructions des portes et fenêtres (Source : Auteur)



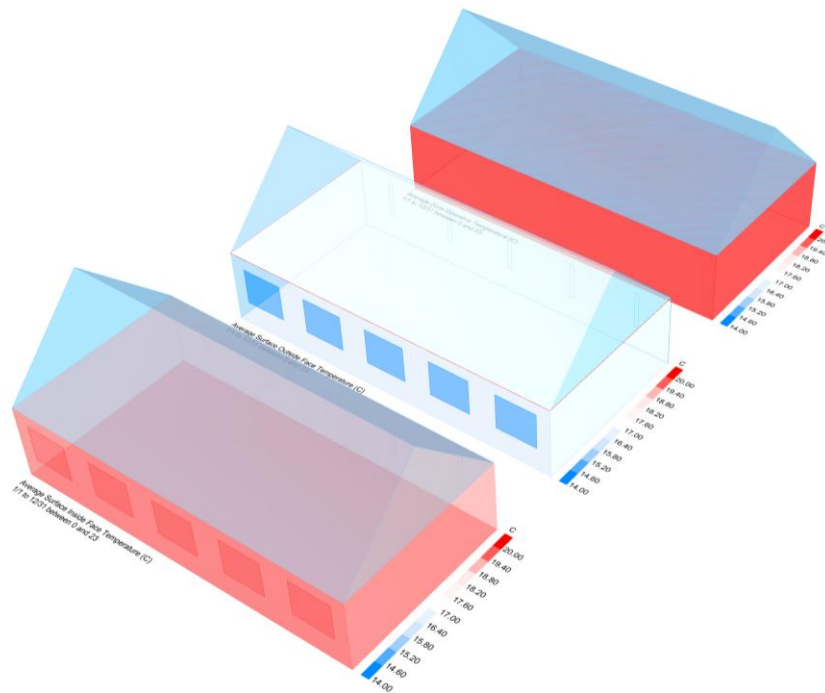
Annexe 100 : Exemple de création graphique paramétrée en fonction des résultats, affiché dans Rhino (Source : Auteur)



Annexe 99 : Affichage dans Rhino des éléments créés dans Grasshopper (Source : Auteur)

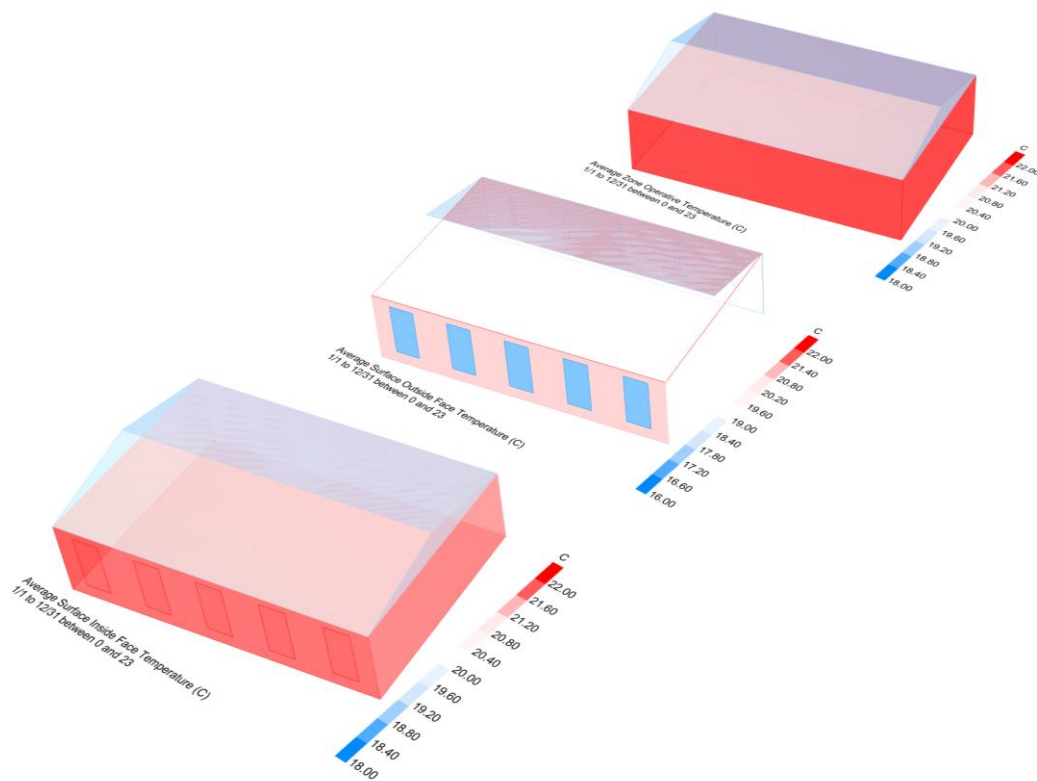
Analyses STD :

Nord-Ouest : Sol-air, 2_1



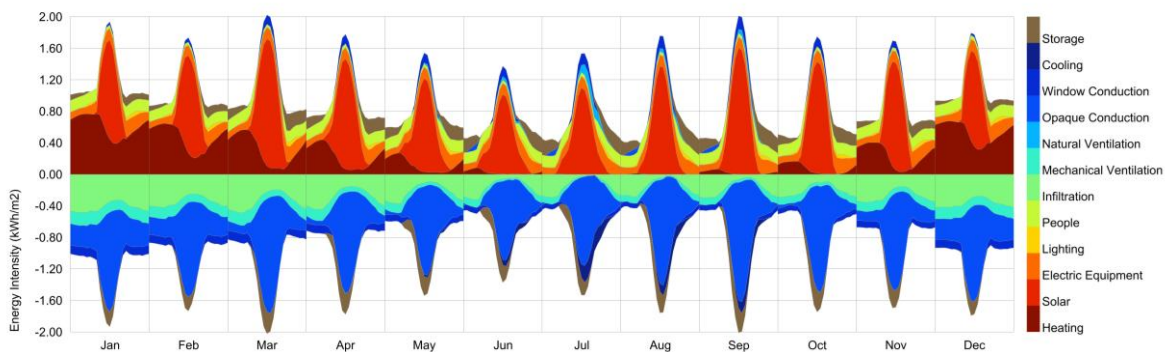
Annexe 102 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas), ratio 2_1 dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

Sud-Est : Sol-air, 1.5_1 + orientation 12°



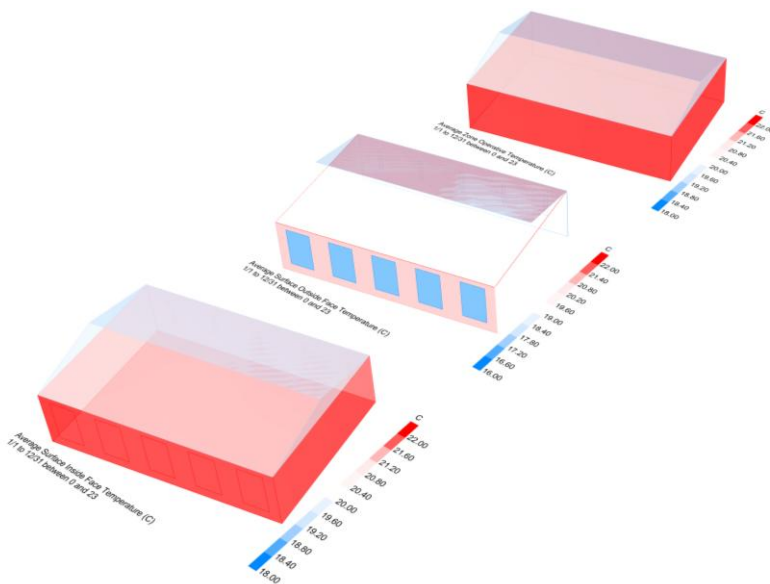
Annexe 103 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas), ratio 1.5_1 dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

Nord-Ouest, Ouvertures :

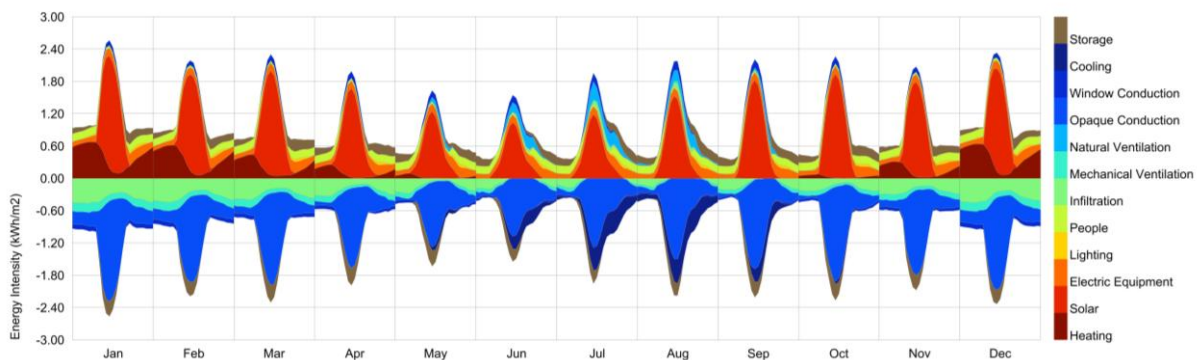


Annexe 104 : Équilibre des charges thermiques après définition du ratio d'ouverture sur chaque façade de la maison dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

Sud-Est, Ouvertures :

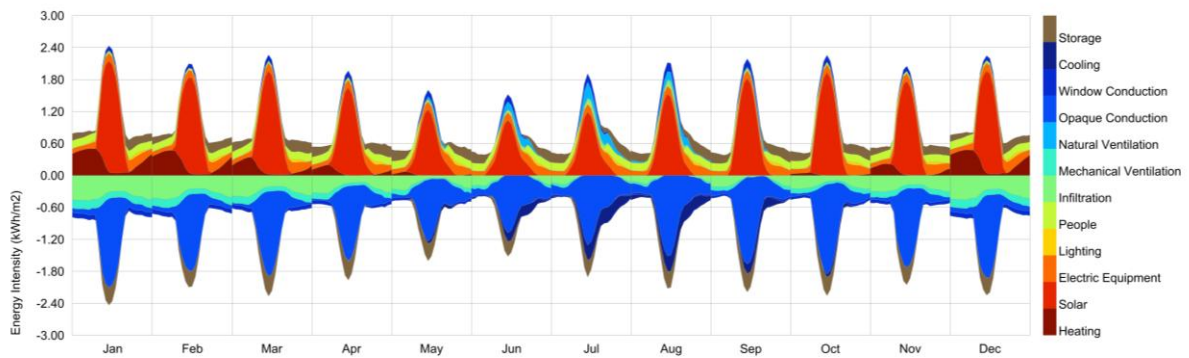


Annexe 105 : Visualisation 3D de la température moyenne des pièces, de la surface intérieure des parois et de la surface extérieure des parois (de haut en bas), ouvertures dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)



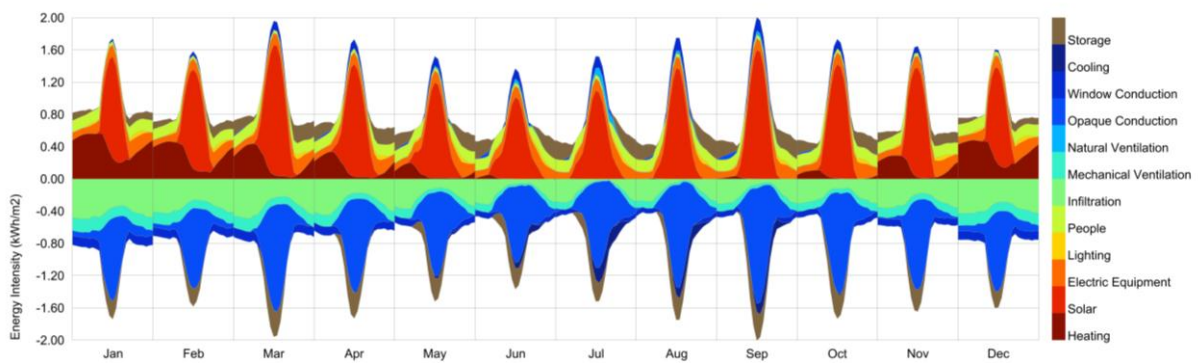
Annexe 106 : Équilibre des charges thermiques après définition du ratio d'ouverture sur chaque façade de la maison dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

Nord- Ouest, murs en pierre de SVF, 60cm :



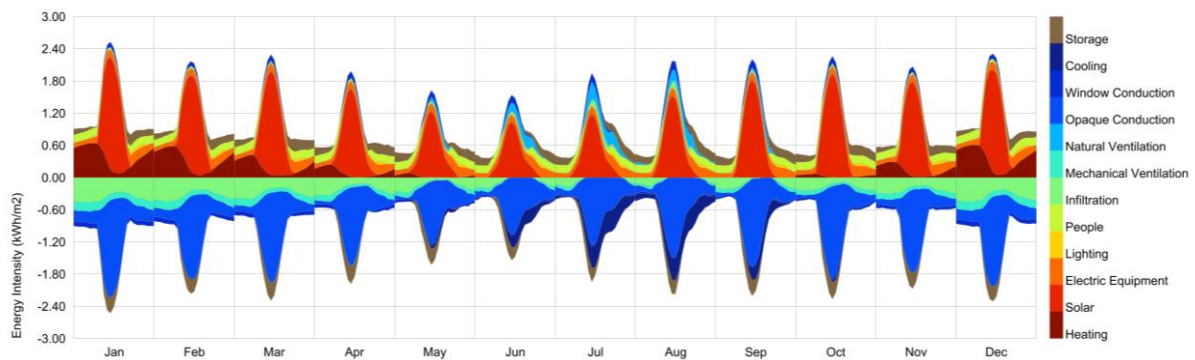
Annexe 107 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec des murs en pierre de SVF de 60cm d'épaisseur dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

Nord-Ouest, murs en pierre doublement isolée avec du béton de chanvre :



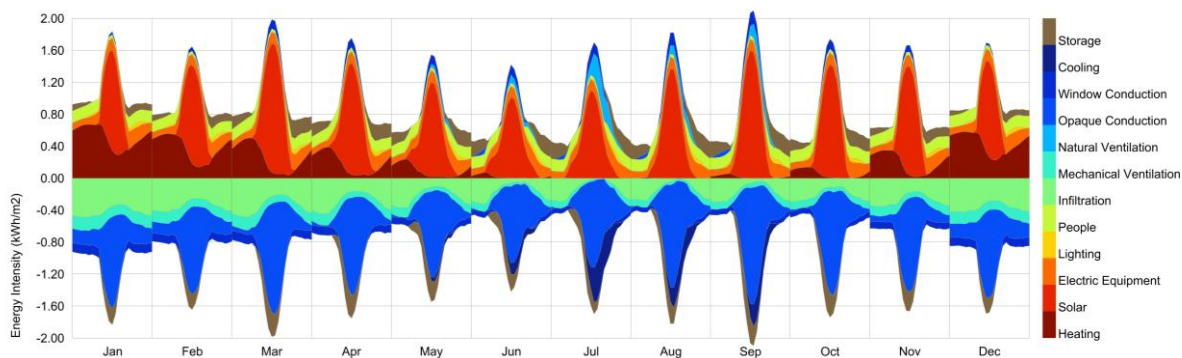
Annexe 108 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec des murs en pierre de SVF et du béton de chanvre de part et d'autre dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

Sud-Est, murs en pierre de VPDG, 60cm :



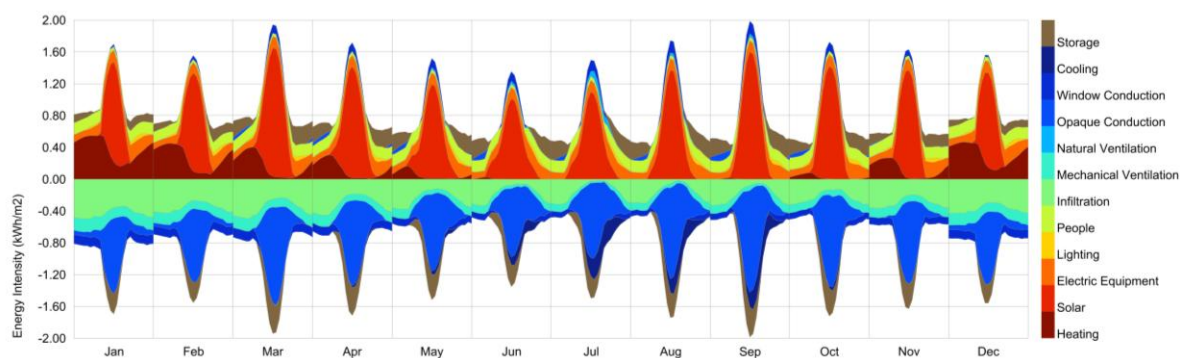
Annexe 109 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec des murs en pierre de VPDG de 60cm d'épaisseur dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

Sud-Est, murs en pierre doublement isolée avec du béton de chanvre :



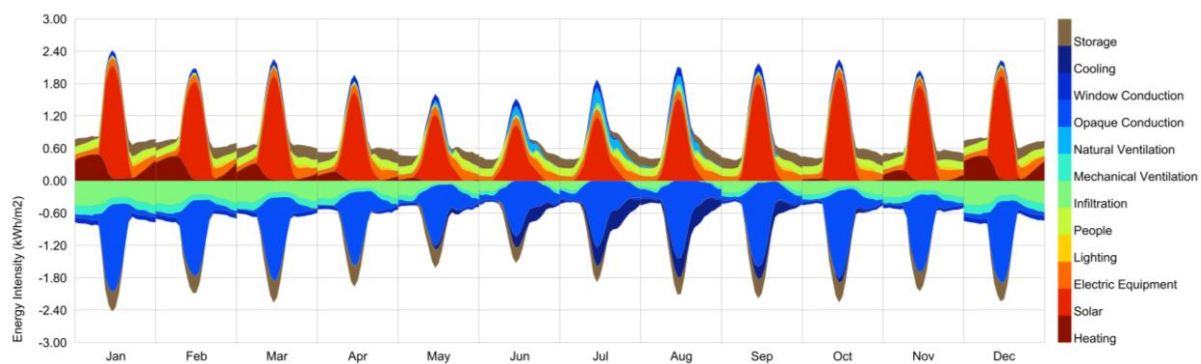
Annexe 110 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec des murs en pierre de VPDG et du béton de chanvre de part et d'autre dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

Nord-Ouest, sol en pierre de SVF, 30cm :



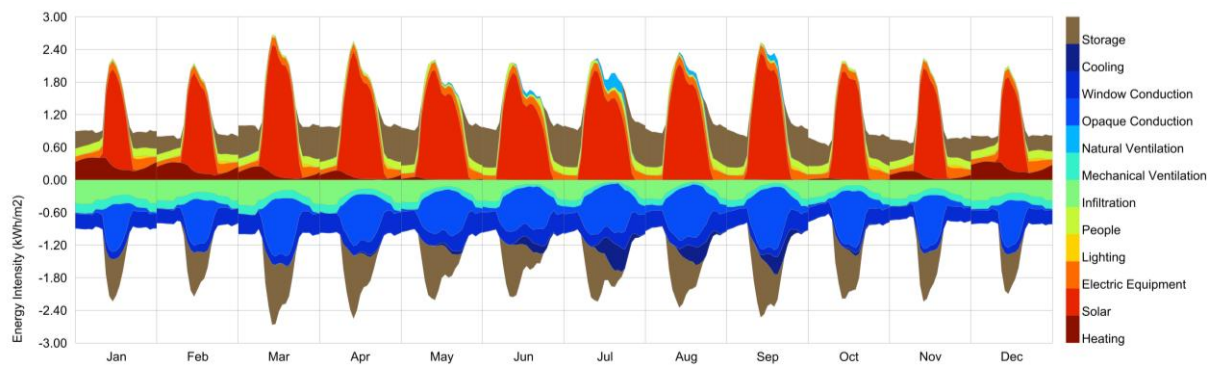
Annexe 111 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec un sol en pierre de SVF de 30cm d'épaisseur dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

Sud-Est, sol en pierre de VPDG, 30cm :



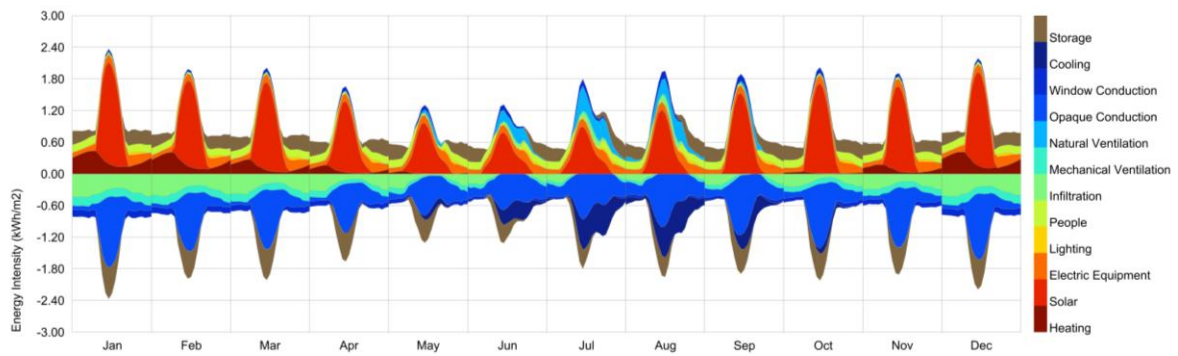
Annexe 112 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique avec un sol en pierre de VPDG de 30cm d'épaisseur dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

Nord-Ouest, maison théorique finale :



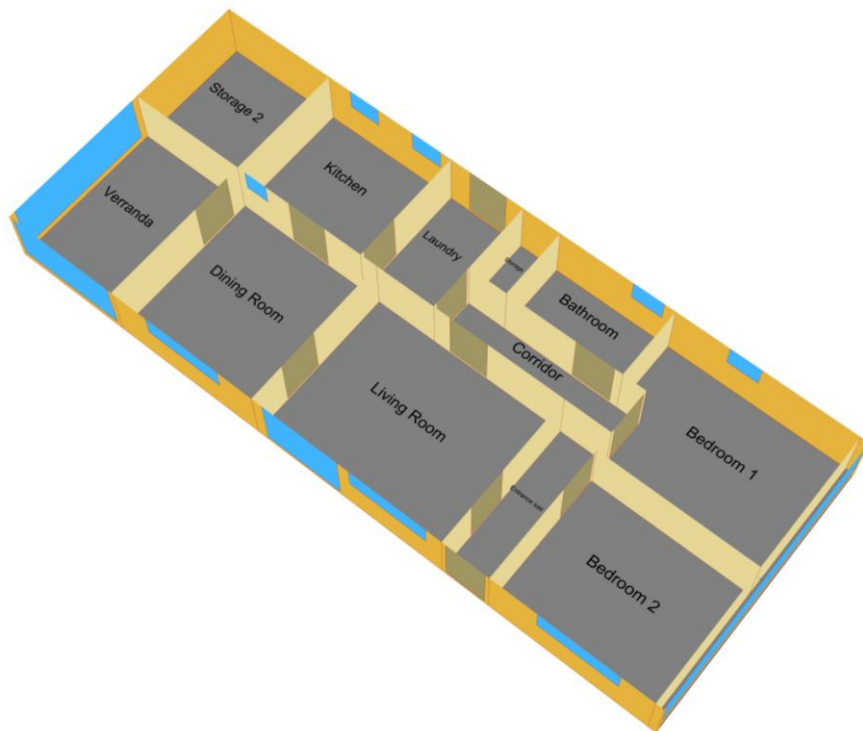
Annexe 113 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

Sud-Est, maison théorique finale :



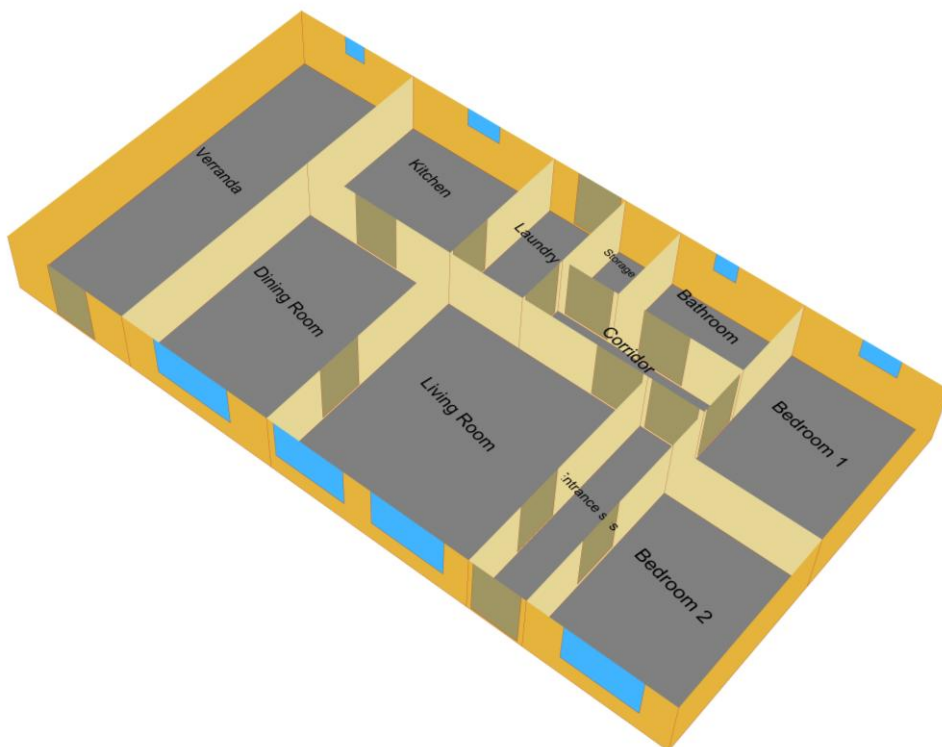
Annexe 114 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale dans la zone Sud-Est (Source : Auteur)

Plan maison Nord-Ouest avec espaces tampons :



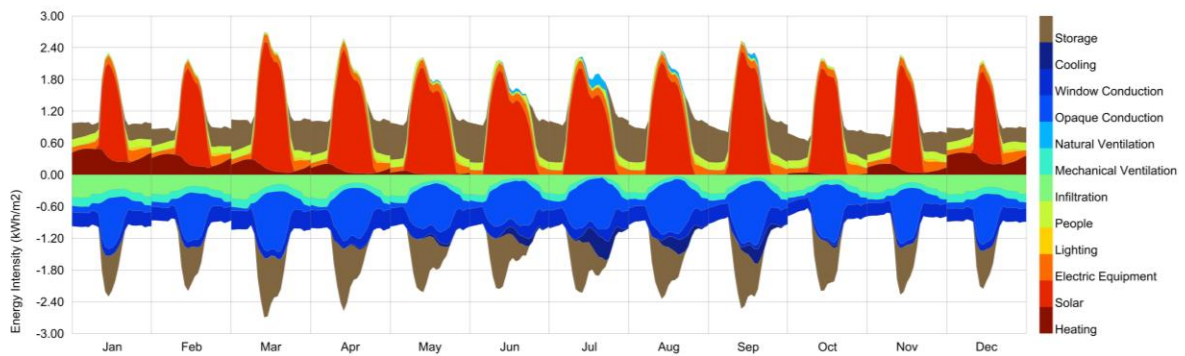
Annexe 115 : Modélisation 3D de la maison finale théorique avec les espaces tampons dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

Plan maison Sud-Est avec espaces tampons :



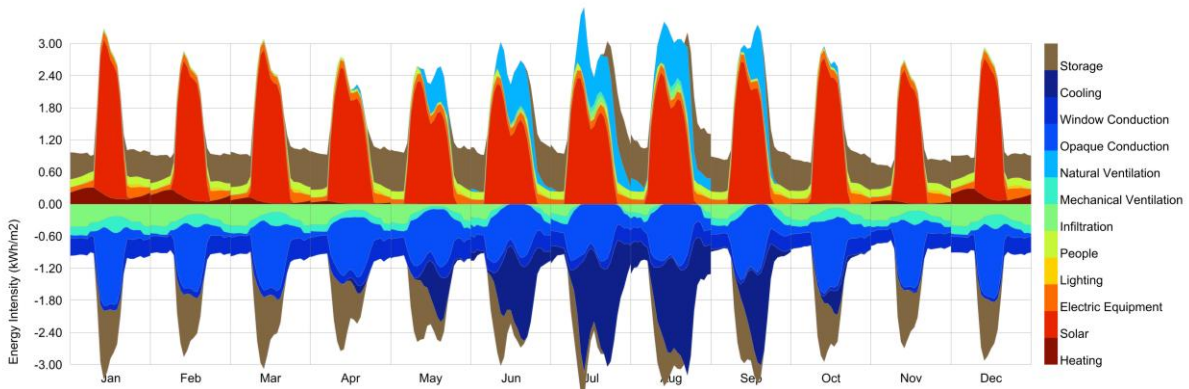
Annexe 116 : Modélisation 3D de la maison finale théorique avec les espaces tampons dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

Nord-Ouest, maison finale avec murs non isolés :



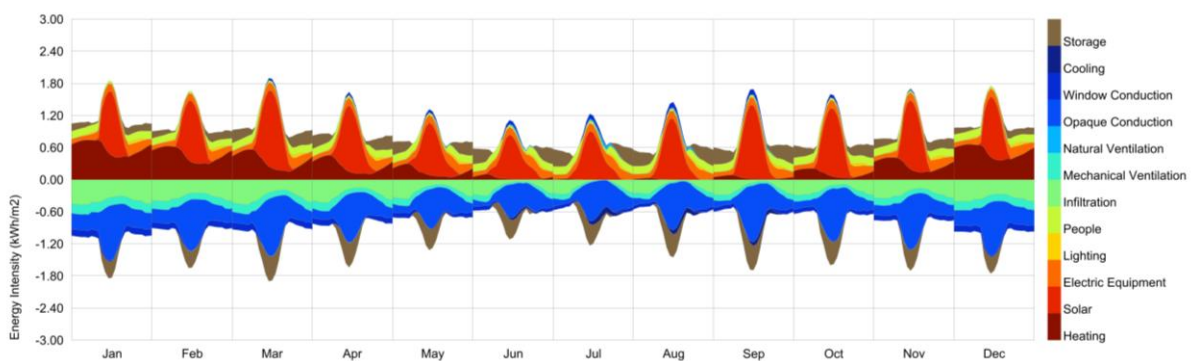
Annexe 117 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale avec des murs en pierre de SVF de 60cm d'épaisseur dans la zone Nord-Ouest (Source : Auteur)

Nord-Ouest, maison à Marseille avec murs non isolés :



Annexe 118 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale avec des murs en pierre de SVF de 60cm d'épaisseur de la zone Nord-Ouest à Marseille (Source : Auteur)

Sud-Est, maison à Rennes avec murs non isolés :



Annexe 119 : Équilibre des charges thermiques pour la maison théorique finale avec des murs en pierre de VPDG de 60cm d'épaisseur de la zone Sud-Est à Rennes (Source : Auteur)

Résumé :

La pierre est aujourd'hui sujette à de nombreux doutes quant à son efficacité thermique. Si ses caractéristiques physiques ne lui confèrent pas un bon pouvoir isolant, elle possède en revanche d'autres qualités souvent négligées dans les évaluations classiques par simulations énergétiques. Comment optimiser le confort hygrothermique lors de la conception d'une maison en pierre naturelle dans un climat tempéré à l'aide de méthodes de conception bioclimatique et de simulations énergétiques ?

La forme construite du bâtiment, l'orientation des ouvertures ou encore la composition des parois sont autant de solutions possibles, mais souvent abordées de manière isolée. Or, la conception architecturale dans son ensemble, en tant qu'étape décisive dans la performance énergétique passive, constitue le principal levier d'optimisation.

Ce travail propose donc une méthode de conception adaptée à la pierre, tenant compte de la localisation du projet, et reposant sur trois piliers interconnectés : l'analyse de l'architecture vernaculaire locale pour en extraire des principes pertinents ; la simulation hygrothermique à l'échelle de la paroi pour en définir la composition optimale ; et la simulation énergétique de la proposition architecturale afin d'en évaluer les performances globales.

Ce processus vise à identifier les éléments optimaux pour atteindre le confort thermique dans une maison en pierre naturelle, et à réaffirmer la pertinence de ce matériau dans une approche bioclimatique en France.

Mots-clés : Optimisation énergétique, Pierre Naturelle, Confort thermique, Solution passive, Architecture bioclimatique.

Abstract :

Stone is today subject to considerable doubt regarding its thermal performance. While its physical properties do not provide strong insulation, it possesses other qualities often overlooked in conventional energy simulation assessments. How can hydrothermal comfort be optimised when designing a natural stone house in a temperate climate using bioclimatic design methods and energy simulations?

The shape of the building, the orientation of the openings and the composition of the walls are all possible solutions, but they are often addressed in isolation. However, architectural design as a whole, as a decisive step in passive energy performance, is the main lever for optimisation.

This study proposes a design method suited to stone construction, tailored to the project's location, and based on three interconnected pillars: the analysis of local vernacular architecture to extract relevant design principles; hygrothermal simulation at the wall scale to define its optimal composition; and whole-building energy simulation to evaluate overall performance.

This process aims to identify the optimal elements required to achieve thermal comfort in a natural stone house, and to reaffirm the relevance of this material within a bioclimatic design approach in the French context.

Key-words: Energy optimisation, Natural Stone, Thermal Comfort, Passive solution, Bioclimatic Architecture.