

ENTRE LES MURS DE TERRE

Le confort invisible.

Comment les bâtiments en terre crue peuvent-ils être adaptés à des zones climatiques extrêmes, afin de garantir un confort thermique optimal tout au long de l'année ?

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier David Serero et Vincent Pierre, enseignants à l'École nationale supérieure d'architecture de Paris-Val de Seine, pour leur accompagnement et leurs remarques tout au long de mon travail. Leurs observations ont permis d'enrichir ma réflexion et d'orienter ma démarche de recherche avec rigueur.

Je tiens également à remercier Dominique Daudon et Thierry Joffroy, pour le temps qu'ils ont consacré à l'échange et au partage de leurs connaissances sur la construction en terre. Leurs conseils techniques et leur expérience de terrain ont joué un rôle déterminant dans la compréhension des réalités constructives abordées au fil de ce mémoire.

Je remercie l'ensemble des personnes qui, à divers moments, ont contribué à la construction de ce projet, par leurs discussions, leurs relectures, ou leur regard critique. Ces échanges ont constitué un appui important dans l'évolution du travail et ont nourri la réflexion menée sur la matière et le confort.

Je souhaite enfin exprimer ma reconnaissance envers ma famille et mes proches, pour leur présence discrète mais constante, leur soutien et leur patience durant cette période d'écriture et de recherche. Leur appui a permis d'aborder ce travail avec sérénité et persévérance.

AVANT PROPOS

Depuis mon enfance, j'ai grandi dans un environnement où le confort thermique faisait partie du quotidien. Mon papa, ingénieur en fluides, m'a sensibilisée très tôt aux systèmes de régulation de la température et à la maîtrise énergétique. Très vite, nos visions se sont distinguées : là où il installe des systèmes pour contrôler la chaleur ou le froid, j'ai voulu imaginer des bâtiments capables de rester confortables sans recourir à la climatisation.

Mon intérêt pour les matériaux s'est précisé au cours de ma licence, lors d'un enseignement sur la terre crue. Ce moment a été décisif : j'ai découvert un matériau simple, ancien, mais aux propriétés thermiques et hygrothermiques remarquables. Depuis, j'ai souhaité explorer comment la terre pouvait être utilisée pour créer un confort invisible, c'est-à-dire un confort qui repose sur les qualités mêmes du matériau et de sa mise en œuvre, sans dépendre de systèmes mécaniques et énergivores.

Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche : comprendre comment la terre crue peut contribuer à concevoir des bâtiments adaptés aux climats extrêmes, conciliant performance thermique et sensibilité architecturale. Il explore l'équilibre entre technique et matériau, entre rationalité et ressenti, en mettant la matière au centre du confort intérieur.

SOMMAIRE

Introduction	09
État de l'art	15
I.1- L'utilisation de la terre	17
I.2- Les climats	50
I.3- L'approche passive	52
I.4- Étude de cas	61
Test & Analyse d'un bâtiment en Terre Crue	76
II.1- Présentation du site d'étude	78
II.2- La démarche	90
II.3- Les enjeux de cette étude	126
Vers une Architecture en Terre Crue Adaptée et Durable	130
III.1- Proposition concrète	133
III.2- Perspective d'une architecture durable	140
III.3- Simulation sur notre cas d'étude	148
Conclusion	164
Bibliographie	170
Annexes	176
Entretiens	
Archives	
Exemples des jeux de données	
Index iconographique	192

INTRODUCTION

L'architecture contemporaine se trouve à un tournant critique. Confrontée à des défis environnementaux majeurs, elle ne peut plus ignorer les conséquences de ses choix constructifs sur le climat, les écosystèmes et les ressources de la planète. Les effets du changement climatique, visible à travers l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes — vagues de chaleur, sécheresses prolongées, pluies intenses, ou encore chutes de neige imprévisibles — bousculent les modes de vie et interrogent sur la pertinence des modèles architecturaux actuels. L'urgence écologique, amplifiée par l'épuisement des ressources naturelles, nous oblige à repenser notre rapport à l'environnement et à reconsidérer nos méthodes de construction.

Face à cette situation, l'architecture se doit d'entamer une véritable transition, tant technique que conceptuelle. Il ne s'agit plus seulement de bâtir des structures solides et esthétiques, mais de concevoir des bâtiments sobres en énergie, adaptés aux spécificités de chaque territoire, et résilients face aux conditions climatiques de plus en plus extrêmes. Cette évolution passe nécessairement par une remise en question des matériaux utilisés. Dominique Gauzin-Müller, dans son ouvrage *Architecture écologique*¹, souligne que le choix des matériaux constitue une des clefs de la transition vers un modèle constructif durable. Les matériaux conventionnels tels que le béton ou l'acier, bien qu'ils aient permis des avancées techniques considérables, présentent aujourd'hui un bilan environnemental très lourd. Leur extraction, transformation et mise en œuvre sont énergivores, émettent de grandes quantités de CO₂, et contribuent à l'artificialisation des sols.

En réaction à ces dérives, une dynamique cherche à réhabiliter des matériaux anciens, locaux et peu transformés. Parmi eux, la terre crue occupe une place croissante. Utilisée depuis des millénaires dans des régions du monde très variées, la terre crue est aujourd'hui redécouverte comme un matériau écologique, économique, et performant. Que ce soit sous forme d'adobe, de pisé ou de briques de terre compressée, elle s'adapte à de nombreuses techniques de mise en œuvre. En plus de sa faible empreinte carbone, elle possède d'excellentes propriétés d'inertie thermique et de régulation de l'humidité. Ce sont ces caractéristiques qui la rendent particulièrement pertinente dans un contexte de changement climatique, où les bâtiments doivent être capables de s'autoréguler pour garantir le confort de leurs usagers sans recourir à des systèmes mécaniques énergivores.

¹ GAUZIN-MÜLLER, Dominique. *Architecture écologique*. Éditions Le Moniteur, Paris, 2001

Dans *Construire en terre. Du grain de sable à l'architecture*, Hubert Guillaud² insiste sur la pertinence de ce matériau dans une logique de développement durable. Il met en avant un matériau abondant, peu coûteux, recyclable, et nécessitant peu d'énergie pour sa mise en œuvre. À cela s'ajoutent des qualités hygrothermiques remarquables, qui permettent à la terre crue d'absorber l'humidité, de stabiliser la température intérieure, et de créer une atmosphère confortable et saine. Dans un contexte où le bâtiment représente près de 40 % des émissions mondiales de CO₂, ces caractéristiques sont loin d'être négligeables³.

Mais au-delà de ses qualités générales, une question centrale demeure : la terre crue est-elle réellement adaptée à des environnements climatiques exigeants ? Cette interrogation prend une dimension particulière en France, où les territoires sont extrêmement diversifiés sur le plan climatique. Ce mémoire propose d'examiner cette problématique à travers l'étude d'un contexte contrasté mais représentatif de différents défis : les Alpes françaises, avec leurs hivers rigoureux, et leurs amplitudes thermiques marquées.

De prime abord dans les Alpes, le principal enjeu réside dans la capacité de la terre crue à conserver la chaleur en hiver tout en limitant les pertes thermiques. La porosité de la terre, qui constitue un avantage en termes de régulation de l'humidité intérieure, peut devenir un inconvénient si elle n'est pas protégée contre les infiltrations. L'usage de techniques spécifiques, comme l'enduit de chaux, les débords de toiture, ou l'intégration d'éléments drainants, est alors crucial. Cela suppose une bonne maîtrise de l'inertie thermique, mais aussi une adaptation des détails constructifs (isolation, gestion des ponts thermiques, protections extérieures).

Pour comprendre le potentiel de la terre crue dans des contextes variés, il est important de bien définir ce matériau. La planète Terre est constituée de cinq grandes couches de sol, dont seule la troisième — le sous-sol — est généralement utilisée pour la construction. Ce sous-sol, situé à environ 20 à 30 cm de profondeur, est composé d'un mélange de sable, de limon, de graviers et surtout d'argile, un liant essentiel qui donne à la terre sa cohésion⁴. C'est cette composition équilibrée qui permet la mise en œuvre de techniques constructives robustes, durables et performantes. L'analyse granulométrique, le taux d'argile, la nature du sable, ainsi que la présence éventuelle de matières organiques, sont autant de critères qui conditionnent la qualité du matériau.

Cette redécouverte contemporaine de la terre crue ne constitue pas un simple retour aux sources, mais bien une réinvention technique et architecturale d'un matériau ancestral, capable de répondre aux exigences du présent. Son efficacité repose non seulement sur ses propriétés physiques, mais aussi sur la capacité des architectes à intégrer des stratégies passives adaptées aux conditions climatiques locales : orientation optimisée, ventilation naturelle, protections solaires, gestion des apports thermiques, et mise en œuvre intelligente des matériaux complémentaires (bois, fibres végétales, chaux, etc.).

2 GUILLAUD, Hubert. *Construire en terre : Du grain de sable à l'architecture*. Éditions Belin, Paris, 2009

3 TCHANG, Nathalie. *L'essentiel de la RE2020*. Éditions Le Moniteur, Paris, 2021

4 DETHIER, Jean (dir.). *Habiter la terre : L'art de bâtir en terre crue, traditions, modernité et avenir*. Éditions Flammarion, Paris, 2020

C'est dans ce cadre que s'inscrit la problématique centrale de ce mémoire :

Comment les bâtiments en terre crue peuvent-ils être adaptés à des zones climatiques extrêmes, afin de garantir un confort thermique optimal tout au long de l'année ?

Pour répondre à cette question, l'hypothèse principale avancée est que la terre crue, combinée à des stratégies architecturales adaptées — orientation, protections solaires, ventilation naturelle — permet de maintenir un confort thermique constant dans les bâtiments, tout en réduisant la dépendance aux systèmes mécaniques de chauffage ou de refroidissement. En explorant les propriétés physiques du matériau et les choix de conception possibles, ce mémoire vise à démontrer que les techniques vernaculaires peuvent être réinterprétées pour répondre aux exigences contemporaines de durabilité et de confort, même dans des contextes climatiques extrêmes.

Cette hypothèse repose sur plusieurs principes :

- La valorisation de l'inertie thermique de la terre crue, qui permet de lisser les fluctuations de température et de garantir un confort sans recours excessif au chauffage ou à la climatisation.
- L'adaptation constructive aux conditions locales (épaisseur des murs, types de fondations, protections contre l'humidité).
- L'intégration de savoir-faire traditionnels et de matériaux locaux, en articulation avec des techniques contemporaines d'ingénierie.
- Et enfin, une approche architecturale sensible au site, au climat, et à la qualité de l'air intérieur.

La méthodologie employée pour ce mémoire associe une approche bibliographique, expérimentale et analytique, afin d'étudier l'adaptation des bâtiments en terre crue aux zones climatiques extrêmes et d'évaluer leur confort thermique.

L'approche bibliographique a permis de comprendre les propriétés physiques et thermiques du matériau terre, ses usages traditionnels et contemporains, ainsi que les principes de confort thermique dans l'architecture bioclimatique. L'étude de références architecturales et de publications scientifiques a constitué la base théorique du travail.

L'approche expérimentale repose sur le relevé de données in situ, l'observation du comportement des matériaux, ainsi que sur la modélisation à l'aide du logiciel Dial+, afin d'évaluer les performances thermiques et hygrométriques de la maison étudiée.

Enfin, l'analyse des résultats, mise en perspective avec la littérature existante et les retours d'expérience des usagers, permet de formuler des stratégies concrètes d'adaptation des bâtiments en terre crue.

Pour structurer cette étude, le mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier s'intéresse à la terre crue et à ses propriétés, en abordant son utilisation dans la construction contemporaine, son historique et ses usages traditionnels, ainsi que ses caractéristiques physiques et thermiques, telles que son inertie et sa capacité hygroscopique, avec leurs avantages et leurs limites.

Le deuxième chapitre est consacré à la Maison 24h : il présente tout d'abord les contraintes climatiques spécifiques à la région étudiée, puis les critères de confort thermique. Pour ensuite découvrir l'histoire du projet, ainsi que le relevé de données, l'analyse graphique et les retours d'expériences des habitants.

Enfin, le troisième chapitre propose des stratégies d'adaptation et des recommandations pour optimiser les performances thermiques des bâtiments en terre crue. Il aborde les choix architecturaux (orientation, protections solaires, ventilation naturelle) et l'optimisation des matériaux, ainsi que la modélisation sur Dial+ pour simuler le confort thermique de la maison. Cette dernière partie conclut par des propositions concrètes pour concevoir des bâtiments en terre crue adaptés aux climats extrêmes.

Ainsi, cette méthodologie vise à articuler théorie et pratique, pour aboutir à une compréhension complète et opérationnelle du rôle de la terre crue dans l'architecture durable face aux défis climatiques.



Figure 1 : Terre crue compactée, ClayWorks

INTRODUCTION

I- ÉTAT DE L'ART

II- TEST & ANALYSE D'UN BÂTIMENT EN TERRE CRUE

III- VERS UNE ARCHITECTURE EN TERRE CRUE ADAPTÉE ET DURABLE

IV- CONCLUSION

V- BIBLIOGRAPHIE

VI- ANNEXES

La première partie de ce mémoire se concentre sur la terre crue, matériau ancestral qui connaît aujourd'hui un regain d'intérêt en architecture durable. L'objectif est de comprendre ses propriétés physiques et thermiques, ainsi que son potentiel pour assurer un confort thermique optimal dans les bâtiments.

Cette partie débute par un retour sur l'histoire et les usages traditionnels de la terre crue, afin de replacer ce matériau dans son contexte culturel et technique. Elle s'attarde ensuite sur ses caractéristiques essentielles, telles que son inertie thermique, sa capacité à réguler l'humidité et sa cohésion, qui expliquent son efficacité en tant que matériau de construction. Enfin, elle examine l'emploi de la terre crue dans la construction contemporaine, mettant en lumière ses avantages, mais aussi ses limites, notamment face aux exigences modernes de durabilité et de confort.

Cette analyse constitue une base indispensable pour la suite du mémoire, car elle permet de comprendre pourquoi et comment la terre crue peut être adaptée aux contraintes des zones climatiques extrêmes, et introduit l'étude des bâtiments existants et à la formulation de stratégies d'adaptation.

I.1. L'utilisation de la terre crue aujourd'hui

L'utilisation de la terre crue dans l'architecture contemporaine soulève des questions cruciales en matière de performance thermique et d'adaptabilité. De nombreux travaux académiques, études de cas et expérimentations explorent la terre crue sous différents angles.

La terre crue est reconnue pour ses multiples techniques de mise en œuvre, comme le pisé, l'adobe ou encore les blocs de terre comprimée. Thierry Joffroy et Hugues Jacquet⁵, soulignent l'évolution historique de ces techniques, adaptées à des contextes culturels et climatiques variés. Ces pratiques traditionnelles, combinées aux innovations actuelles, visent à améliorer les performances thermiques et mécaniques de ce matériau.

Des études expérimentales récentes, comme celles de Giada Giuffrida et Hamza Allam⁶, ont évalué le comportement thermique des murs en blocs de terre comprimée (BTC). Les résultats montrent une excellente inertie thermique, mais également des limites en terme de résistance à l'humidité, nécessitant des solutions adaptées comme l'ajout de matériaux biosourcés ou géosourcés. Ces ajustements permettent de renforcer la performance des murs, tout en respectant les principes de durabilité.

Les climats froids et humides présentent donc des contraintes supplémentaires spécifiques pour les matériaux de construction. Jean-Marie Hauglustaine et Francy Simon⁷, expliquent que l'optimisation thermique dans ces contextes repose sur une conception soignée des parois pour limiter les pertes de chaleur tout en régulant l'humidité intérieure. De manière complémentaire, les travaux de Taleb Boulerbah⁸ mettent en avant l'importance d'associer des matériaux de haute performance thermique, comme la terre crue, avec des stratégies architecturales adaptées au climat local. Son analyse s'appuie sur plusieurs critères : les données bioclimatiques du site (température, humidité, ensoleillement, vents), les performances thermiques des matériaux (inertie, conductivité, capacité thermique), ainsi que l'efficacité d'éléments architecturaux traditionnels (orientation, compacité, ouvertures, patios). En combinant relevés de terrain, enquêtes auprès des habitants et simulations thermiques, l'étude met en évidence comment ces solutions vernaculaires permettent d'assurer un bon confort thermique sans avoir recours aux systèmes mécaniques.

5 JOFFROY, Thierry. Les architectures de terre crue : des origines à nos jours. In : JACQUET, Hugues (dir.), Savoir & faire : La terre. Éditions Actes Sud, Arles, 2016.

6 GIUFFRIDA, Giada, IBOS, Laurent, BOUDENNE, Abderrahim et ALLAM, Hamza. Comportement thermique de murs en blocs de terre comprimée : comparaison entre simulations et mesures à l'échelle paroi. In : 32^e Congrès Français de Thermique, Strasbourg, France, juin 2024

7 HAUGLUSTAIN, Jean-Marie et SIMON, Francy. L'isolation thermique des murs. 2^e édition, Éditions Eyrolles, Paris, 2018.

8 BOULERBAH, Taleb. L'amélioration du confort thermique de l'habitat traditionnel par l'adaptation d'un matériau de haute performance et le traitement de l'espace patio : Cas d'étude, secteur sauvegardé de la ville de Laghouat. Mémoire de Master, Université Biskra, 2019.

Dans ce contexte, la terre crue offre des avantages uniques. Son inertie thermique et sa capacité à réguler l'humidité en font un matériau efficace dans des conditions difficiles, même si sa sensibilité à l'eau reste un obstacle majeur. La Conférence NoMaD 2015⁹ propose des solutions pratiques, comme l'application d'enduits stabilisés ou la conception de détails architecturaux (toits débordants, soubassements imperméables), pour surmonter ces points de défaillances.

L'architecture passive est, elle aussi, un défi. Cette architecture est définie par des principes comme l'orientation, la ventilation naturelle et l'apport solaire. Le but étant de constituer un cadre idéal pour maximiser les performances thermiques des bâtiments en terre crue. Sophie Abacc Grigoletto et ses collègues, lors de la Conférence NoMaD, insistent sur l'importance d'une conception intégrée pour combiner les avantages thermiques et hygrothermiques de la terre avec des dispositifs passifs efficaces.

Un exemple intéressant est le traitement du patio dans des contextes humides, comme l'a étudié Boulerbah¹⁰, dans le cas de la ville de Laghouat. Le patio agit comme un espace tampon, favorisant une ventilation naturelle et limitant les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur. Cette stratégie est potentiellement applicable aux bâtiments en terre crue dans des climats similaires.

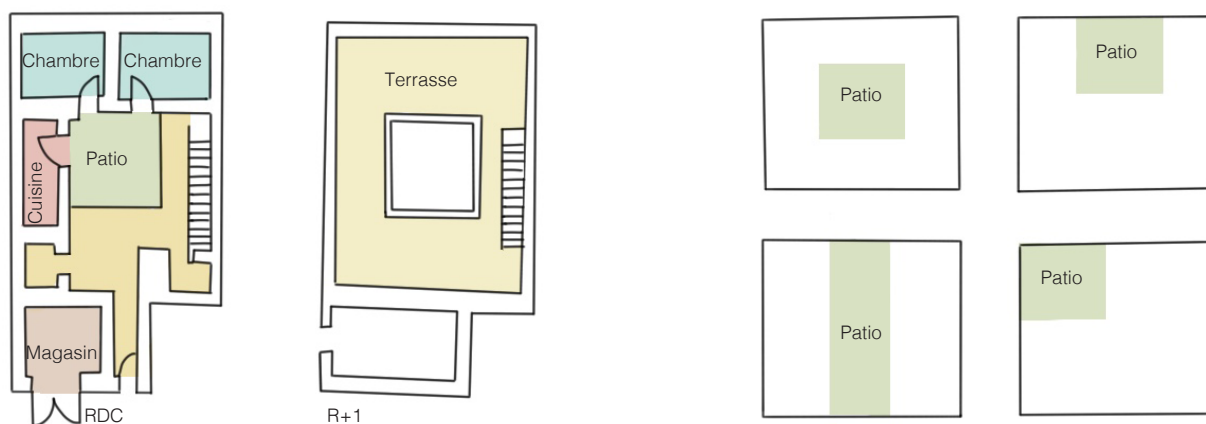


Figure 2 : Habitat avec patio style ksurien,
Redessiné par l'auteur

Ces études permettent d'identifier les principaux enjeux liés à l'utilisation de la terre crue dans l'architecture contemporaine, en particulier dans les contextes climatiques extrêmes. Il en ressort que si les qualités d'inertie thermique et de régulation hygrométrique de la terre crue sont largement reconnues, son comportement dans des environnements humides ou froids reste encore partiellement maîtrisé, nécessitant une approche combinée entre technique et conception architecturale.

⁹ Conférence Internationale Francophone NoMad (Nouveaux Matériaux et Durabilité), organisée par le Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement (LGCgE), France, 2015.

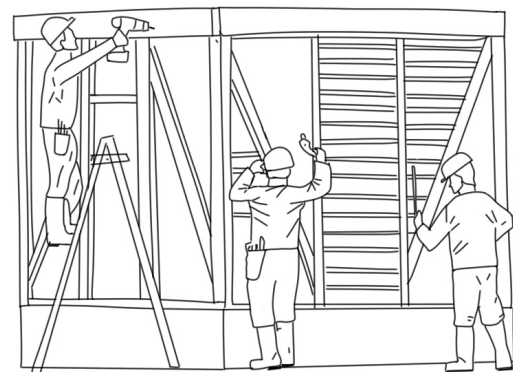
¹⁰ BOULERBAH, Taleb, op. cit.

I.1.1. Techniques de construction

La terre crue est l'un des plus anciens matériaux de construction. Ce dernier est arrivé bien avant l'apparition du métal et du béton armé. Dès ses premières utilisations, différentes techniques ont été mises en œuvre pour l'exploiter. Avec la révolution néolithique et la sédentarisation de l'homme vers la fin du 10^e millénaire avant notre ère, son usage s'est diversifié, donnant naissance à des méthodes comme le torchis et la bauge. Le pisé et l'adobe sont quant à eux arrivés un peu plus tard.

Aujourd'hui nous pouvons compter 12 techniques différentes de mise en œuvre de la terre crue dans la construction : la terre creusée, la terre couvrante, la terre remplissante, la terre découpée, la terre comprimée, la terre façonnée, la terre empilée, la terre moulée, la terre extrudée, la terre de garnissage, la terre coulée, et enfin la terre paille¹¹. Parmi ces techniques sept sont principalement employées on parle ici de l'adobe, du pisé, de la terre paille, du torchis, du façonnage, des blocs comprimé et de la bauge. Nous allons nous pencher sur quelques unes de ces techniques pour comprendre comment la terre est généralement mise en œuvre.

11 FONTAINE, Laetitia et ANGER, Romain. Bâtir en terre : Du grain de sable à l'architecture. Éditions Belin, Paris, 2009, page 26.



Tout d'abord le torchis, qui fait partie de la famille de terre de garnissage, est sans doute l'une des plus anciennes techniques de construction qui demeure la plus employée dans le monde.

Les structures portantes et les claies qui servent de support au garnissage du torchis sont de conceptions variées mais le principe de construction reste identique partout. Dans certaines régions, pour améliorer la durabilité du torchis, la terre était malaxée non pas à l'eau mais à l'urine de cheval¹²: les résultats sont étonnants.

Aujourd'hui, le torchis fait l'objet de nombreuses recherches : par exemple, au Pérou, l'ININVI (Institut National de Recherche et de Normalisation de la Vivienda) fait des essais de panneaux préfabriqués faciles à assembler¹³.



Les édifices en torchis se caractérisent par une structure en bois légère, garnie de terre mélangée à de la fibre végétale, par exemple de la paille. Ce mélange de terre et de fibres constituent le torchis. La matière est ensuite appliquée à l'état plastique, et recouvre un lattis de bois fixé entre des poteaux appelés colombes. Ce mélange de bois et de terre, facile à mettre en œuvre, est aujourd'hui utilisé dans diverses constructions contemporaines occidentales pour ses avantages écologiques et son efficacité thermique.



Pour cette technique il faut disposer d'une terre plutôt plastique voir même visqueuse avec une teneur en eau comprise entre 15 et 35%¹⁴. Cette terre est généralement argileuse pour assurer une bonne adhérence avec l'ossature en bois, l'ajout de fibres permet d'absorber les excès en eau ce qui favorise un séchage plus homogène tout en réduisant les fissures. Cela permet également d'améliorer la souplesse du mélange.

¹² CRAterre. Traité de construction en terre. Éditions Parenthèses, Marseille, 2009, p. 187.

¹³ Ibid.

¹⁴ FONTAINE, Laetitia et ANGER, Romain. op. cit., page 27

Figure 3 : Illustration de la mise en œuvre du Torchis
Dessiné par l'auteur

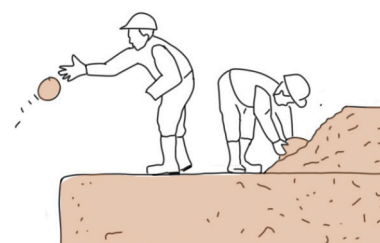
En ce qui concerne la technique de la bauge, qui fait partie de la famille d'empilement de terre, elle se résume à empiler des boules de terre malléables, semblables à de la pâte à modeler, auxquelles on ajoute généralement une fibre végétale. Il s'agit le plus souvent de paille ou de balle de grains¹⁵, qui améliore sa cohésion et sa résistance à la traction.



La version rurale française consiste à empiler des paquets de terre plastique à l'aide d'une fourche. Le mur est ensuite retailé avant que la terre ne sèche. Les murs ainsi formés, épais et monolithiques (construits d'un seul tenant), rappellent ceux en pisé. Dans de nombreuses régions du monde, la construction en bauge est façonnée entièrement à la main, telle une sculpture monumentale.



Si avec le temps cette technique a été abandonnée en Europe, la construction en terre empilée est encore d'actualité dans la plupart des pays en développement. L'architecture en bauge est aussi modeste que spectaculaire; il peut s'agir aussi bien de simples habitations rurales (Afghanistan) que de villes aux immeubles altiers de plusieurs étages (Yémen).



Pour cette technique il est nécessaire d'avoir une terre argileuse mais riche en sable et en limon. Il faut trouver le juste milieu, une terre trop sableuse manquerait de cohésion, tandis qu'une terre trop argileuse entraînerait des fissures au séchage¹⁶.



¹⁵ CRAterre. op.cit, p. 176.

¹⁶ FONTAINE, Laetitia et ANGER, Romain. op.cit page 27

Figure 4 : Illustration de la mise en œuvre de la Bauge
Dessiné par l'auteur



L'adobe est une technique de moulage qui consiste à façonner des briques de terre crue. À l'origine ces briques étaient pétries à la main en forme de pain de terre. Avec le temps des moules en bois en forme de parallélépipède sont apparus.

La particularité de ces briques est son mode de séchage qui se fait à l'air libre, au soleil. Il faut donc prendre en compte la phase de séchage dans le planning du chantier, cette étape peut prendre 7 à 10 jours par brique.



Cette technique permet une construction rapide, comparable aux matériaux industriels, elle peut être utilisée pour édifier des murs, des arcs, des voûtes et des coupoles sans avoir recours à d'autres matériaux. Elle est particulièrement économique, notamment dans les pays en développement, où la fabrication des briques et la construction nécessitent peu d'outils.



Pour des briques d'adobe performantes il faut une terre similaire à la bauge c'est-à-dire une terre plastique voir même visqueuse avec une teneur en eau comprise entre 15 et 35%. Il faut également un peu d'argile et assez de limon et de sable pour renforcer les briques¹⁷.



¹⁷ FONTAINE, Laetitia et ANGER, Romain. op.cit page 27

Figure 5 : Illustration de la mise en œuvre de l'Adobe
Dessiné par l'auteur

La technique du pisé, fait partie de la famille des terres comprimées. Cette dernière consiste à compacter de la terre humide dans des coffrages pour construire des murs massifs. Une fois extraite du sol la terre est versée dans un coffrage en bois. De fine couches de 10 à 20cm d'épaisseur sont étalées dans le coffrage puis damées à l'aide d'un pisoir (manche en bois avec à la base une masse en bois ou en métal). Une fois la terre damée, le mur est immédiatement décoffré, sans nécessiter d'enduit.



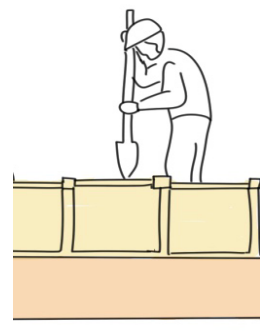
L'épaisseur des murs en pisé varie entre 40 et 60cm. Bien que simple, cette méthode est longue à réaliser.

De nombreuses avancées ont été faites autour de cette technique, en partie grâce à Nicolas Meunier. Depuis 1986, le pisé peut être préfabriqué en usine. Cette révolution allège la tâche des ouvriers et assure une construction plus rapide. Un système de compression automatisée permet de réaliser les éléments du mur. Après séchage ils sont mis en place avec des engins de levage¹⁸.



Le pisé est la seule technique qui permet de mettre en œuvre une terre qui contient des cailloux et des graviers. Pour cette technique, on cherche à avoir une terre très peu argileuse pour éviter les fissures au séchage.

L'idéal est une terre riche en sable et en gravier avec une faible proportion de limon¹⁹.



¹⁸ DETHIER, Jean. op.cit page 47

¹⁹ FONTAINE, Laetitia et ANGER, Romain. op.cit page 27

Figure 6 : Illustration de la mise en œuvre du Pisé
Dessiné par l'auteur



Les briques de terre compressées (BTC), font partie de la famille de terre compressées, ces briques trouvent leurs origine dans les briques d'adobe. Mais avec le temps il fallait aller plus vite et donc gagner en efficacité. C'est pourquoi nous en sommes arrivés à la production de briques à l'aide d'une presse qui vient compacter la terre humide.

Cette méthode moderne offre les mêmes avantages que la maçonnerie en brique. Bien que l'utilisation d'une presse nécessite un investissement plus élevé, les BTC peuvent être stockées immédiatement, contrairement aux adobes qui doivent sécher longtemps sur de grandes surfaces avant d'être manipulés.



Ces briques de terre compressée sont moins performantes que les briques classiques en terre cuite. En effet, une brique classique peut résister jusqu'à 40 Mpa, alors qu'une brique de terre crue (non stabilisée) aura du mal à résister au-delà de 6Mpa. L'ajout d'un stabilisant dans une brique de terre compressée peut accroître sa résistance jusqu'à 10Mpa, mais elle sera toujours beaucoup moins résistante qu'une brique traditionnelle.



Pour obtenir des briques performantes il faut une terre principalement sableuse avec tout de même de l'argile et du limon pour les renforcer²⁰.



²⁰ Ibid.

Figure 7 : Illustration de la mise en œuvre des Briques de terre crue
Dessiné par l'auteur

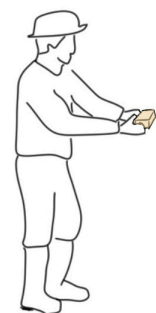
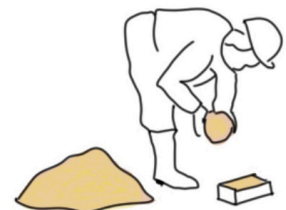
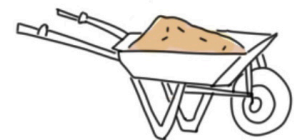
La terre-paille est une technique qui associe de la terre argileuse à de la paille. La terre joue le rôle de liant, tandis que la paille forme une armature fibreuse qui apporte légèreté, résistance et isolation. La terre est d'abord nettoyée de ses gros cailloux, puis mélangée à de l'eau pour obtenir une barbotine. On y incorpore ensuite la paille, coupée en brins d'environ 15 à 40 cm.

Cette technique peut ainsi prendre plusieurs formes selon les besoins du projet. Le terre-paille peut être mis en œuvre banché, c'est-à-dire compacté dans des coffrages autour d'une ossature, formant une paroi monolithique légère et isolante. Elle peut également être utilisée comme remplissage dans une structure bois, où elle joue principalement un rôle d'isolant tout en assurant une bonne régulation hygrothermique.

Grâce à la préfabrication, le terre-paille peut aussi se présenter sous forme de briques, de hourdis ou de panneaux de mur pré-assemblés, permettant une pose rapide et une meilleure maîtrise du séchage. Ces différentes déclinaisons offrent une grande souplesse constructive, allant de la mise en œuvre artisanale aux systèmes plus industrialisés. Ces éléments légers facilitent une construction rapide et économique.

Une fois sèche, la paroi est solide, isolante et permet une bonne accroche pour les enduits. Un long temps de séchage, souvent de plusieurs mois, est nécessaire avant la finition.

Pour ce genre de technique il faut un terre dite liquide, sous forme de barbotine. La terre est complètement dispersée dans l'eau et constitue un liant²¹.



²¹ Ibid.
Figure 8 : Illustration de la mise en œuvre de la Terre Paille
Dessiné par l'auteur



Le façonnage est une technique de construction qui utilise la terre à l'état plastique, sans coffrage ni moule.

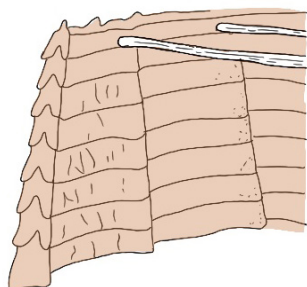
Elle permet de modeler directement les formes à la main, offrant une grande liberté architecturale.

Cette méthode est largement employée en Afrique subsaharienne, notamment dans les régions du Sahel et les zones équatoriales, où elle a donné naissance à des architectures remarquables par leur beauté et leur originalité, comme les célèbres cases-obus des Mousgoum au nord du Cameroun.



Sa mise en œuvre repose entièrement sur le savoir-faire des bâtisseurs, qui connaissent parfaitement la consistance idéale de la terre.

Avant utilisation, la terre est préparée par des phases d'hydratation, de pétrissage et de séchage, parfois enrichie de fibres végétales ou de matières organiques pour améliorer sa cohésion.



Pour cette technique il est recommandé d'avoir une terre plastique. La terre doit être malléable comme de la pâte à modeler. Il faut que ce soit facile de façonner une boule de terre qui ne colle pas au doigt²².

²² Ibid.
Figure 9 : Illustration de la mise en œuvre du Façonnage
Dessiné par l'auteur

Les techniques de construction en terre crue varient principalement en fonction des régions, car elles dépendent de nombreux facteurs. Les conditions géologiques, climatiques et environnementales locales influencent fortement la terre et donc la technique utilisée. Par exemple, le pisé est souvent utilisé dans les zones où la terre est graveleuse et où l'humidité est modérée, tandis que l'adobe est privilégié dans les climats chauds et secs où le séchage à l'air est facilité. La présence, ou non, de forêts influence également les choix constructifs, notamment dans l'association de la terre avec des éléments en bois pour les structures. De même, l'accès à l'eau est déterminant dans la faisabilité de certaines techniques comme la bauge. Ainsi, les systèmes constructifs en terre crue sont toujours le résultat d'une adaptation fine au contexte local, reflet d'un savoir-faire ancré dans le milieu. Dans la continuité de cette adaptation locale, le climat joue un rôle primordial dans le choix de la technique mise en œuvre.

Dans des zones arides et chaudes, il faut privilégier le pisé ou l'adobe qui disposent d'une inertie thermique très performante. Le pisé peut aussi être utilisé dans les climats plus tempérés, tout comme les briques de terre comprimée qui assurent une bonne régulation de l'humidité et du confort thermique. Dans les climats très humides il est tout de même conseillé de protéger la terre en la stabilisant avec l'ajout de chaux ou de ciment.

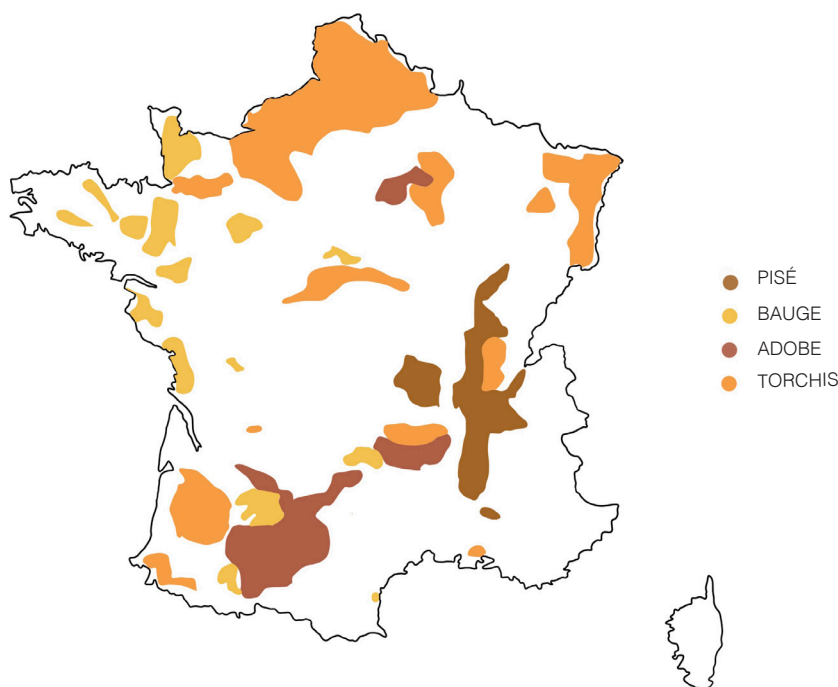


Figure 10 : Répartition du patrimoine architectural en terre crue en France
Source : Cratère, Redessiné par l'auteur



Tous ces processus vont se perfectionner avec le temps c'est ce que nous verrons par la suite. À l'heure actuelle on estime que plus d'un tiers de l'habitat humain est en terre crue. Cette proportion s'élève à plus de la moitié des habitations dans les pays du Sud. On trouve des exemples d'architecture en terre crue, de la plus modeste à la plus monumentale, sur tous les continents. La terre crue est un matériau de construction utilisé depuis des millénaires et toujours présent aujourd'hui. La diversité de ses techniques permet une grande richesse architecturale, répandue à travers le monde. Ces techniques s'adaptent toujours au contexte dans lequel elles sont mises en œuvre : elles tiennent compte du climat, de la nature du sol et surtout des ressources locales disponibles. Cette variété de procédés renvoie à un savoir-faire local et traditionnel profondément ancré dans les cultures. Malgré son caractère ancestral, la terre crue reste d'une étonnante actualité et continue d'être utilisée dans de nombreux pays. Elle incarne à la fois la tradition et la performance environnementale, ouvrant la voie à une réflexion sur son adaptation aux enjeux contemporains de l'architecture.

Figure 11 : Répartition du patrimoine architectural en terre crue dans le monde
Source : Craterre, Redessiné par l'auteur



I.1.2. La terre crue au fil des années

Avant même le Néolithique, dès la Préhistoire, l'homme en Mésopotamie commence à façonner ses propres habitations en utilisant la terre qu'il creuse, compacte et modèle à la main. Pour construire ces premières huttes et habitats troglodytiques, il s'inspire directement du monde animal, reproduisant instinctivement les abris naturels et les terriers en terre.



I.1.2.1 Le Néolithique

Le Néolithique, marqué par la sédentarisation, représente une avancée majeure pour la construction en terre. La stabilisation progressive des populations favorise l'émergence de techniques plus élaborées. Pour construire des habitations plus pérennes on utilise différentes techniques telles que la superposition de briques crues, mise en œuvre à l'aide d'un mortier de terre. Ces évolutions permettent la formation des premiers regroupements humains, donnant naissance à de petits villages. L'un des premiers exemples connus est Çatal Höyük, en actuelle Turquie. Ce village fondé en 7 000 av JC, a été retrouvé par trois archéologues en 1951, il s'étendrait tout de même sur 13 hectares et aurait regroupé jusqu'à 5 000 habitants²³. À ce jour, les fouilles qui ont débutées en 1961 ont permis de retrouver 166 maisons, ce qui ne représenterait que 5 % du site.

Les habitations collées les unes aux autres, sans rue ni espace public, étaient accessibles par les toits grâce à des échelles. À l'intérieur, des bancs et couchettes enduits de chaux côtoyaient des peintures de scènes de chasse et de divinités²⁴. L'une de ces premières villes est marquée par l'absence de temple et de centre politique. Chaque maison avait son propre lieu de culte, reflétant une société égalitaire, sans classe dominante. Çatal Höyük illustre ainsi les premières formes d'urbanisation et d'organisation sociale humaine. Les maisons construites en briques de terre crue étaient adaptées au climat chaud et sec en été, avec des hivers un peu plus froids. Grâce à l'inertie thermique de la terre, la journée l'espace restait frais, et la nuit la chaleur était restituée. De plus l'absence de rues et l'agencement compact des maisons, permettaient de garder la chaleur entre chaque logement, tandis que l'accès par les toits facilitait la ventilation.

²³ FONTAINE, Laetitia et ANGER, Romain. op.cit page 46

²⁴ DETHIER, Jean. op.cit page 72
Figure 12 : Illustration de Çatal Höyük



I.1.2.2 L'Antiquité

L'antiquité est marquée par de nombreuses avancées, comme l'arrivée de l'adobe, ainsi que du pisé. En effet certains territoires comme la Mésopotamie, sont pauvres en matériaux. C'est pourquoi la terre s'y est développée à grande échelle²⁵.

Toutes ces avancées techniques ont permis la construction d'édifices de plus grande envergure, comme les Ziggourats qui apparaissent en 2100 av J-C. Les ziggourats sont d'imposant édifices construits le plus haut possible pour créer un lien entre le ciel et la terre, et permettre aux dieux de descendre sur terre. Ces temples mésopotamiens sont de véritables monuments bâtis en briques de terre crue, généralement recouvertes par un parement de briques de terre cuite. Les ziggourats situées dans des régions arides font face à des étés très chauds et des hivers froids. La terre joue un rôle primordial pour garder un confort à l'intérieur de ces temples. Grâce à ses propriétés thermiques la terre absorbe la chaleur le jour et la restitue la nuit. Ce qui permet un rafraîchissement plus naturel.

L'apparition des premiers stabilisants, tels que la chaux ou le plâtre, facilite l'utilisation de la terre crue pour des réalisations architecturales ambitieuses. C'est à cette époque que les pyramides de Nubie, ainsi qu'une partie de la grande muraille de chine, voient le jour.

Ces constructions démontrent que la terre crue permet une grande diversité architecturale et qu'elle permet une durabilité importante.

²⁵ Ibid page 74
Figure 13 : Ziggurat de Ur, Nassiriyah, Irak
Photographe : Hasan



I.1.2. 3 Le Moyen Âge

Au fil du temps, les techniques de construction en terre se perfectionnent, permettant ainsi une utilisation plus aboutie. La protection contre l'eau s'améliore grâce à l'application d'enduits, à l'ajout de toiture en bois, ainsi qu'à l'intégration de surélévations et de fondations en pierre. Le pisé est amélioré, la brique de terre crue est associée à des structures bois et les enduits se font maintenant à base de chaux. Depuis le Moyen âge de nombreuses fortifications se font en pisé, comme les casbahs du Maroc ou encore la grande muraille de Chine.

Les Casbahs, ces demeures au plan carré qui s'élèvent sur 3 ou 4 étages, sont faites en pisé. Les ornements qui finissent généralement la façade sont-elles faites en adobe. Ces façades sont majoritairement ponctuées de petites ouvertures.

On ne le sait que très peu, mais une partie considérable de la muraille de chine est faite de terre. Pour cette construction les bâtisseurs ont fait le choix de construire avec ce qu'ils avaient sous leurs pieds. C'est pourquoi la nature de la muraille évolue, elle est parfois en pierre, en terre, ou même en sable, en fonction de ce que les ouvriers trouvaient comme ressources²⁶.

De nombreuses fortifications médiévales en pisé sont encore visibles aujourd'hui. Leur état de conservation s'explique notamment par la stabilisation de la terre à la chaux, qui renforce sa structure et améliore sa durabilité.

26 FONTAINE, Laetitia et ANGER, Romain. op.cit page 9
Figure 14 : Aït Ben Haddou, Morocco
Photographe : Raúl Mermans



I.1.2. 4 Les Temps Modernes

L'époque moderne est une période où les techniques liées à la terre font un grand pas en avant. Ce sont les prémices de l'industrialisation, avec les premières expérimentations industrielles sur la stabilisation de la terre avec de la chaux et du ciment. En Amérique latine ainsi qu'en Afrique, les maisons coloniales vont beaucoup se développer avec la technique de l'adobe et du pisé. Mais cette évolution ne s'arrête pas là, c'est à ce moment que l'on découvre les briques de terre compressée. Toutes ces techniques vont permettre de développer des villages entiers construits en terre, adaptées à certaines techniques locales.

Dans les régions arides d'Asie centrale et d'Iran, la terre crue a été un matériau de construction privilégié à l'époque moderne (XVIe-XIXe siècles), permettant de réguler naturellement la température face aux écarts de température parfois extrêmes. En Iran, la ville de Yazd, surnommée la perle du désert, n'est faite que de terre. Cette ville marquée par un enchaînement de voûtes et de dômes faites uniquement de briques crues enduites de chaux, témoigne de la diversité des ouvrages en terre crue. À l'époque, les bâtisseurs n'ont pas eu le choix du matériau, ils ont fait avec ce qu'ils avaient sur place, cela met en évidence les capacités de la terre crue²⁷.

Les maisons traditionnelles étaient construites en briques crues, et protégées par des enduits de terre et de chaux. Elles étaient souvent adossées les unes aux autres, pour minimiser l'impact du vent et optimiser l'inertie thermique. Certaines villes emblématiques comme Yazd (Iran), Khiva (Ouzbékistan) ou Bam (Iran) illustrent ces techniques ancestrales.

Tout comme les ziggourats, les villages de Yazd (Iran), Khiva (Ouzbékistan) et Bam (Iran) sont soumis à un climat aride. En plus de l'utilisation de la terre qui permet un rafraîchissement naturel, des dispositifs tels que des tours à vent (appelées badgirs), elles aussi construites en adobe, voient le jour. Ces tours font en général 3m de large par 5m de long et s'élèvent sur 15m de haut²⁸. Le but étant d'évacuer l'air chaud tout en captant l'air frais pour rafraîchir les espaces intérieurs et donc d'améliorer le confort en été.

²⁷ DETHIER, Jean. op.cit page 114

²⁸ FONTAINE, Laetitia et ANGER, Romain. op.cit page 21

Figure 15 : Yazd, Iran
Photographe : Parastoo Maleki



I.1.2.5 Le XIXème

Quelques années plus tard, autour du XIXème siècle les maisons en pisé ce sont développées de façon importante dans le sud de la France. Ces maisons utilisent la technique du bon chapeau et des bonnes bottes, autrement dit une toiture et un soubassement performant pour protéger la terre. En général, on retrouve des débords de toiture pour éviter le contact de la pluie sur le mur en terre. Il faut aussi de bonnes bottes, c'est à dire un soubassement en pierre, pour que l'eau stagnante ou les remontées capillaires ne soient pas en contact direct avec le mur en pisé. L'usage du pisé dans la construction de certaines maisons dans le sud de la France permet une bonne inertie thermique et protège de la chaleur estivale.

Contrairement aux régions où le climat est aride, on peut ici retrouver plus de précipitations. C'est pourquoi il faut protéger la terre. Soit on retrouve donc des dehors de toiture importants, soit la terre est recouverte d'un enduit²⁹.

Plus ou moins à la même époque, de l'autre côté de l'océan Atlantique, se développent les missions espagnoles en Amérique. De nombreuses maisons et Églises vont être construites en adobe.

²⁹ DETHIER, Jean. op.cit page 256
Figure 16 : Maison en pisé
Photographe : Patrice DOAT



I.1.2. 6 Le XXème

Le XXème siècle est le siècle du renouveau de la terre crue. Progressivement une certaine industrialisation de la terre crue se met en place, les BTC sont de plus en plus utilisées sur les chantiers. On va également trouver de nouvelles formules de mortier, ainsi que de terre stabilisée pour des performances encore plus poussées³⁰. De nouvelles techniques vont émerger, on va parler de béton de terre ainsi que de blocs de terre comprimés stabilisés, une sorte de nouvelle brique de terre comprimées. L'enduit va également aussi se moderniser.

Avec toutes ces avancées, de nombreuses expérimentations vont se développer un peu partout dans le monde. On peut s'arrêter ici sur Hassan Fathy, un architecte égyptien. Il conçoit le village New Gourni entièrement en brique de terre crue. Ce projet, conçu dans les années 1940, avait pour objectif de relocaliser un village près de Louxor, tout en proposant une architecture durable et adaptée au climat aride. Hassan Fathy a privilégié l'usage de la terre crue, notamment des briques d'adobe et des voûtes nubiennes, afin de réduire la dépendance aux matériaux industriels et d'assurer un confort thermique optimal grâce à une ventilation naturelle et une inertie thermique performante.

Son approche était à la fois écologique et sociale, impliquant directement les habitants dans la construction pour leur transmettre des savoir-faire traditionnels et renforcer leur autonomie. Cependant, le projet a rencontré des résistances culturelles, car la terre crue était perçue comme un matériau pauvre, et il a souffert d'un manque de soutien gouvernemental, entraînant son abandon partiel.

Malgré ces obstacles, New Gourni est aujourd'hui un modèle emblématique d'architecture bioclimatique, démontrant la pertinence des techniques vernaculaires pour les défis contemporains du développement durable³¹.

³⁰ Ibid, page 334

³¹ FATHY, Hassan. Architecture for the Poor : An Experiment in Rural Egypt. University of Chicago Press, Chicago, 1976.

Figure 17 : New Gourni
Photographe : UNESCO



I.1.2. 7 Le XXIème

Le XXIème siècle est une redécouverte de la terre crue pour la construction. Ce matériau durable et écologique essaye de reprendre sa place au milieu du béton, du ciment, de l'acier... La terre crue est réintégrée dans l'architecture contemporaine grâce à des techniques améliorées et une meilleure reconnaissance du matériau.

L'industrialisation de la terre crue au siècle précédent permet aujourd'hui de créer des bâtiments en terre beaucoup plus poussés.

En effet certaines parties de murs en pisé peuvent être préfabriqués en usine, ce qui permet de construire des bâtiments beaucoup plus grands et beaucoup plus rapidement.

On peut prendre ici exemple sur le plus grand bâtiment en terre crue d'Europe, le bâtiment Ricola à Bâle. Ce bâtiment conçu par Herzog & de Meuron en 2013, est l'un des rares bâtiments contemporains en terre crue préfabriquée en Europe. Il sert d'entrepôt pour l'entreprise suisse Ricola, spécialisée dans les plantes médicinales.

Construit avec des murs en pisé préfabriqués, il combine modernité et durabilité. Les blocs de terre compressée ont été fabriqués hors site, puis assemblés sur place, garantissant une excellente inertie thermique et une faible empreinte carbone. Ce projet démontre que la terre crue peut être intégrée à l'architecture industrielle moderne tout en respectant des principes écologiques³².

Ce nouveau siècle est, là encore, une grande avancée pour la terre crue. Les techniques liées à la terre sont de plus en plus performantes. Cela vaut aussi bien pour le pisé, que pour les blocs de terre compressée. On va chercher de plus en plus loin en assemblant la terre à d'autres matériaux plus modernes, comme le bois ou l'acier, pour créer des bâtiments encore plus performants.

32 MACK, Gerhard. Seven Buildings 1983–2014 – Ricola. 2014.

Figure 18 : Maison des plantes de Ricola
Photographe : Iwan Baan



On peut citer l'exemple de la Wa Shan Guest House en Chine, construite en 2012 sur le campus de la China Academy of Art à Hangzhou. Conçue par l'architecte Wang Shu, lauréat du prix Pritzker, cette maison d'hôtes constitue une œuvre emblématique de son approche architecturale. Ce bâtiment illustre une approche contemporaine de la terre crue en intégrant des techniques traditionnelles et des matériaux recyclés. Ses murs en pisé, réalisés avec de la terre compactée, assurent une excellente inertie thermique et une esthétique brute et naturelle. Wang Shu utilise également de nombreux matériaux de récupération provenant de la démolition d'anciens bâtiments.

On retrouve par exemple des tuiles traditionnelles pour les toits, des briques et pierres anciennes intégrées aux murs pour enrichir la texture, ainsi que du bois récupéré pour la charpente, les poutres et certaines finitions intérieures. En combinant terre crue et matériaux de réemploi, la Wa Shan Guest House incarne une architecture durable et respectueuse du patrimoine, tout en réinterprétant les savoir-faire traditionnels chinois. La Wa Shan Guest House, s'inscrit dans un climat subtropical humide marqué par des étés chauds et humides, ainsi que des hivers doux. La terre crue permet d'absorber l'humidité ambiante, et de stabiliser le climat intérieur et garantit un confort climatique intérieur³³.

La terre crue fait partie de l'histoire depuis les premières formes d'habitats, elle parcourt les époques en passant d'un abri préhistorique à un bâtiment contemporain. Depuis tout ce temps, les techniques se sont perfectionnées et les savoir-faire ont été enrichies.

Les modes constructifs évoluent selon le climat, la géographie et les ressources locales. De la Mésopotamie aride, au climat tempéré d'Europe, la terre crue a toujours su s'adapter avec des réponses contextuelles et écologiques avant l'heure.

Après un déclin face aux matériaux industriels, le XXe siècle marque le renouveau de l'utilisation de la terre crue. Les architectes réinventent la terre avec des approches innovantes, la terre devient alors un matériau d'avenir, associé à la durabilité et au réemploi.

Ce retour à la terre est le synonyme d'une prise de conscience écologique et culturelle, la terre n'est plus considérée comme un matériau pauvre, mais comme une matière performante. La terre est aujourd'hui une alternative aux matériaux émetteur de CO₂.

33 DETHIER, Jean. op.cit page 432
Figure 19 : Wa Shan Guest House, Chine
Photographe : Iwan Baan

I.1.3. Propriété de la terre crue

La terre crue est un matériau dont les qualités et les comportements varient selon sa composition, sa mise en œuvre et son environnement. Comprendre ses propriétés fondamentales permet d'évaluer son potentiel dans la construction contemporaine, en particulier dans des contextes climatiques exigeants. Cette section présente les caractéristiques essentielles qui définissent son usage architectural.

I.1.3.1. Performance thermique

Que ce soit dans des climats arides, tempérés ou humides, la terre crue s'adapte aux conditions locales grâce à son inertie. Chaque région développe des solutions architecturales spécifiques (Badgirs en Iran, cours intérieures en Asie centrale, voûtes nubiennes en Égypte), créant ainsi des espaces à la fois fonctionnels et agréables, malgré la chaleur extérieure.

La terre crue dispose d'une inertie thermique remarquable. Cela signifie que son utilisation à elle seule permet de réguler naturellement la température intérieure. En effet, la terre stock la chaleur le jour pour la restituer particulièrement lentement la nuit ce qui limite les variations de température entre le jour et la nuit. Dans les climats plus froids la terre permet de garder la chaleur intérieure et limite les pertes thermiques la nuit³⁴. Néanmoins, elle ne présente pas de réelles propriétés isolantes, ce qui limite son efficacité lorsqu'elle est employée seule pour isoler un bâtiment.

I.1.3.2. Régulation hygrométrique

La terre permet également une certaine régulation de l'hygrométrie. On parle ici d'un matériau hygroscopique, autrement dit la terre absorbe et libère l'humidité en fonction de l'air ambiant. Dans les climats plus humides, cette propriété permet un confort intérieur beaucoup plus important.

Ce phénomène limite les risques de condensation sur les parois, réduisant ainsi l'apparition de moisissures ou d'altération de l'air intérieur. C'est un avantage considérable dans une perspective de santé et de bien-être des occupants³⁵.

³⁴ CRAterre. op.cit. page 187

³⁵ RÖHLEN, Ulrich & ZIEGERT, Christof. Construire en terre crue : Construction – Rénovation – Finitions. Éditions du Moniteur, Paris, 2013.

I.1.3.3. Adaptabilité architecturale

La terre crue permet la mise en œuvre de stratégies architecturales adaptées à chaque contexte climatique. Par exemple, dans les régions humides, les bâtiments peuvent être surélevés afin de préserver les structures de l'humidité et des infiltrations d'eau. Dans les zones désertiques, des dispositifs comme les tours à vent (badgirs) assurent une ventilation naturelle efficace.

Ces solutions, profondément enracinées dans les savoir-faire vernaculaires, montrent comment la terre crue, bien pensée, peut répondre aux contraintes locales de manière durable.

I.1.3.4. Performances environnementales

Comparée à des matériaux industrialisés comme le béton, la terre crue présente des atouts environnementaux majeurs. Constituée d'un mélange naturel d'argile, de sable, de limon et d'eau, la terre crue requiert très peu de transformation avant son utilisation, souvent directement prélevée et mise en œuvre sur le site même de construction. En revanche, le béton repose sur la production de ciment, un processus très énergivore et fortement émetteur de CO₂.

L'empreinte carbone de la terre crue est donc bien plus faible que celle de n'importe quel matériau industriel. De plus, la terre est recyclable à 100 %, contrairement aux autres matériaux qui posent de grandes difficultés de réemploi.

I.1.3.5. Résistance mécanique et à l'eau

D'un point de vue mécanique, la terre crue est nettement moins résistante que le béton. Sa performance dépend fortement de la technique utilisée (pisé, adobe, blocs de terre comprimée). Par exemple, les blocs de terre comprimée (BTC) offrent une meilleure tenue que l'adobe ou la bauge, mais restent en deçà des standards du béton³⁶.

Sa sensibilité à l'eau représente également une limite importante. Sans protection adaptée (enduits, débords de toit, soubassements imperméables), la terre peut se dégrader rapidement. À l'inverse, le béton peut être facilement imperméabilisé et est beaucoup moins vulnérable à l'humidité³⁷.

³⁶ CRAterre. op.cit. page 187

³⁷ Ibid.

I.1.3.6. Synthèse : Avantages et Limites

Si l'on devait comparer le béton et la terre crue, on verrait deux matériaux aux logiques totalement différentes. Le béton, issu de procédés industriels, vise la performance immédiate, la rapidité d'exécution et la standardisation. La terre crue, au contraire, s'inscrit dans une démarche sobre, locale et respectueuse de l'environnement.

Sur le plan environnemental, la différence est considérable : la terre crue, extraite à proximité du chantier et peu transformée, consomme très peu d'énergie et émet très peu de CO₂. Le béton, lui, repose sur la production du ciment, un processus extrêmement énergivore et polluant. À ce titre, la terre crue représente une alternative pertinente dans un contexte de transition écologique et de recherche de matériaux plus vertueux.

Du point de vue du confort, la terre crue possède des qualités naturelles que le béton ne peut offrir : son inertie thermique et sa capacité à réguler l'humidité assurent un confort intérieur stable et sain, sans avoir recours à des systèmes mécaniques. Le béton, bien qu'il soit plus résistant, reste un matériau « froid » qui ne régule ni la température ni l'hygrométrie.

Cependant, la terre crue présente aussi certaines limites. Sa résistance mécanique est plus faible, ce qui restreint son usage dans les constructions de grande portée. Elle est également sensible à l'eau et nécessite des protections adaptées comme des enduits, des soubassements imperméables ou des débords de toit.

En résumé, si le béton incarne la solidité et la durabilité industrielle, la terre crue symbolise une approche plus raisonnée et écologique de la construction. Son utilisation demande une véritable connaissance du matériau et une conception architecturale adaptée, mais elle ouvre la voie à une architecture plus durable et plus en harmonie avec son environnement³⁸.

38 Ibid

I.2 Les climats froids et humides : définition des contraintes et opportunités

La problématique de ce mémoire s'établit sur un climat assez contrasté. Nous nous intéresserons aux Alpes Françaises, un climat froid mais avec une grande variété climatique.

I.2.1 Les Alpes Françaises

I.2.1.1 Le Climat

Les Alpes Françaises regroupent six départements : la Haute-Savoie, la Savoie, l'Isère, les Hautes-Alpes, les Alpes-de-Haute-Provence et les Alpes-Maritimes. La région des Alpes présente une grande diversité de conditions climatiques, fortement influencées par l'altitude, l'exposition des versants et la configuration des vallées. On y retrouve des climats variés, allant des zones de basse montagne aux sommets les plus élevés. Les hivers sont généralement longs et froids, avec des chutes de neige fréquentes, plus abondantes en altitude. Les températures hivernales peuvent varier de quelques degrés au-dessus de zéro dans les vallées à bien en dessous de -10 °C dans les zones plus élevées, accentuées par les vents froids.

Les étés restent courts, mais peuvent connaître des journées chaudes, notamment dans les vallées exposées au soleil, où les températures peuvent atteindre facilement les 30 °C et plus. Le rayonnement solaire est plus intense en altitude, tandis que l'ensoleillement varie selon l'orientation des versants, les versants sud étant plus lumineux que les versants nord.

Les précipitations sont également hétérogènes, allant de pluies modérées dans certaines vallées à de fortes chutes de neige sur les massifs élevés, avec des cumuls annuels souvent compris entre 1200 et 2000 mm. Les amplitudes thermiques entre le jour et la nuit sont importantes partout dans la région, parfois supérieures à 10-15 °C.

Cette diversité climatique impose aux constructions des exigences variées : isolation adaptée pour supporter le froid hivernal, toitures et structures capables de supporter la neige, matériaux résistants aux cycles gel/dégel, et conception bioclimatique pour tirer parti du rayonnement solaire en hiver tout en limitant la surchauffe en été. La nature de la terre, des matériaux disponibles et l'orientation des bâtiments doivent ainsi être soigneusement considérées pour garantir confort et durabilité³⁹.

³⁹ CREA Mont-Blanc. Climate change and its impacts in the Alps. Disponible en ligne : <https://creamontblanc.org/en/climate-change-and-its-impacts-alps/>, consulté le 24 novembre 2024.

I.2.1.2 De la Terre Crue dans les Alpes

Contrairement aux idées reçues, il n'est pas nécessaire de se trouver en fond de vallée ou en zone alluviale pour trouver de la terre crue utilisable. Même dans les Alpes, à plus de 1000 mètres d'altitude, il est tout à fait possible de rencontrer des sols riches en terre crue. En réalité, les sols se forment partout où la roche-mère se dégrade sous l'effet du gel, de la pluie, de la gravité ou du vent. Dans les Alpes, cette roche-mère est très variée — on y trouve des formations calcaires, des schistes, mais aussi de nombreux dépôts glaciaires issus des anciennes glaciations.

Ces processus géologiques anciens — mouvements tectoniques, érosion progressive, alternance des climats — ont créé une grande diversité de sols. Dans certaines zones, les matériaux morainiques et les dépôts glaciaires forment des mélanges très équilibrés entre argile, limon et sable, parfaits pour la fabrication de pisé ou de bauge. Même sur des plateaux, d'anciennes terrasses agricoles ou des versants exposés, on peut trouver des terres intéressantes. Bien sûr, chaque sol doit être analysé localement, mais la montagne offre souvent plus de ressources qu'on ne le pense. La terre y est présente, formée lentement au fil des siècles, et prête à être utilisée.

Pour mieux comprendre cette présence, nous avons croisé la carte des carrières d'argile avec la carte géologique de la France. Il en ressort que les zones les plus riches en terre crue correspondent à des sols d'origine paléogène — une période qui s'étend de –65 à –23 millions d'années. C'est autour de –56 Ma qu'un épisode clé a marqué la planète : le dépôt d'une argile marine dé-carbonatée, dans des environnements marins peu profonds. Ces couches argileuses, très riches, sont encore exploitées aujourd'hui.

Ce croisement d'informations nous montre clairement que la géologie conditionne fortement la disponibilité de la terre crue. Même si les Alpes sont un territoire jeune, complexe et très dynamique, elles conservent localement des dépôts argileux hérités de cette histoire ancienne. C'est ce qui rend possible l'usage de la terre crue même en haute montagne.

I.3 - Définir l'approche passive

I.3.1 Principes fondamentaux : orientation, ventilation naturelle, gestion des apports solaires.

L'architecture passive se développe de plus en plus de nos jours, le Passif est la méthode de conception de bâtiments la plus aboutie sur le plan énergétique. Elle vise à utiliser au mieux les apports de chaleur solaires, et à les conserver à l'intérieur grâce à une isolation très renforcée, tout en garantissant une bonne qualité de l'air aux usagers.

Le besoin de chauffage est donc minimal bien qu'il reste nécessaire de chauffer quelques jours par an, quand les conditions climatiques l'imposent. Pour arriver à ce résultat, de nombreux dispositifs sont mis en place. De manière plus concrète, une maison dite passive consomme au maximum 42 kWh/m²/an alors qu'une maison conventionnelle demande plus ou moins 200 kWh/m²/an.

I.3.1.1 Dispositifs

Dans un premier temps l'élément principal à prendre en compte est l'orientation solaire. Il faut trouver le juste milieu pour avoir un apport de chaleur suffisant en hiver, tout en restant dans un confort avec des températures plus élevées en été. Généralement dans les bâtiments passifs d'aujourd'hui on trouve une façade sud très ouverte pour apporter un maximum de chaleur en hiver, et une façade nord plus fermée pour diminuer les déperditions de chaleur.

Cette stratégie fonctionne bien en hiver, mais en été avoir une façade sud très ouverte provoque de fortes chaleurs. Il faut par conséquent réussir à se protéger du soleil. Pour cela, il existe différentes solutions : une casquette, qui va protéger des rayons hauts du soleil d'été, mais qui va laisser passer les rayons plus bas d'hiver, on peut aussi penser une façade double peau qui permet d'occulter plus ou moins complètement la façade sud. Ou alors tout simplement on peut venir intégrer au projet des arbres feuillus en été, qui vont venir créer un filtre, et en hiver ils vont perdre leurs feuilles et laisser passer les rayons du soleil.

Les bâtiments passifs sont également vigilants à l'isolation de l'enveloppe pour garder la chaleur en hiver et la fraîcheur en été. Pour cela il est conseillé d'isoler toutes les parois extérieures aussi bien les murs que la toiture et le sol. Cela va engendrer une certaine épaisseur (minimum 30cm).

Pour être encore plus performant, il faut éviter les ponts thermiques et chercher à avoir une isolation la plus continue possible sans entrée de froid.

La ventilation est tout aussi importante, l'idéal est de pouvoir penser un système de ventilation naturelle sans l'aide de la mécanique, tout en garantissant un renouvellement d'air pur et sain⁴⁰.

40 HARLOT-VALDIEU, Catherine et OUTREQUIN, Philippe. Bâtiments passifs tertiaires. Éditions Le Moniteur, 2017. [impacts-alps/](#), consulté le 24 novembre 2024.

I.3.1.2 Réglementation

Tous ces dispositifs sont encore en développement et sont de plus en plus performants. Il existe 4 critères pour obtenir la labellisation « Bâtiment Passif / Passivhaus ». Il faut un besoin de chauffage inférieur à 15kWh/m² /an, il faut également que la consommation d'énergie primaire soit inférieure à 60 kWh/m²/an d'énergie renouvelable. Il faut aussi une absence de fuites et de passages d'air et pour finir il faut que les jours avec des pics de température intérieure supérieure à 25°C représentent moins de 10 % des jours de l'année. Une fois ces 4 critères réunis on peut parler de bâtiment passif.

Aujourd'hui, les bâtiments à faible consommation énergétique se développent de plus en plus, notamment grâce aux réglementations qui évoluent dans ce sens. En France, deux grandes normes encadrent cette démarche : la RT 2012 et la RE 2020. La RT 2012 (Réglementation Thermique 2012) avait pour objectif principal de limiter la consommation d'énergie des bâtiments neufs. Elle imposait une consommation maximale de 50 kWh/m²/an en moyenne, en prenant en compte le chauffage, la ventilation, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage et la climatisation. Cette réglementation encourageait déjà l'usage de solutions passives comme une bonne orientation du bâtiment, une isolation renforcée ou une conception compacte. Elle représentait une avancée importante à l'époque, mais elle se concentrait uniquement sur la performance énergétique.

Depuis 2022, la RE 2020 (Réglementation Environnementale 2020) a pris le relais, avec des ambitions plus larges. En plus de poursuivre les efforts sur la consommation d'énergie, elle intègre désormais l'impact environnemental du bâtiment sur tout son cycle de vie, notamment à travers l'analyse des matériaux utilisés. Elle favorise l'utilisation de matériaux biosourcés comme le bois, la terre ou le chanvre, et limite le recours aux énergies fossiles, en encourageant plutôt les énergies renouvelables. La RE 2020 prend aussi en compte le confort d'été, un enjeu de plus en plus important face aux changements climatiques et aux épisodes de canicule⁴¹.

En résumé, la RT 2012 visait surtout à construire des bâtiments peu énergivores, tandis que la RE 2020 cherche à aller plus loin en construisant des bâtiments à la fois économes en énergie, confortables en toutes saisons, et avec un impact carbone le plus faible possible.

41 VERITAS. Éléments de conception des bâtiments : exigences réglementaires et normatives. Éditions Le Moniteur, 2016.

I.3.2 Le passif à l'épreuve du réel : jusqu'où peut-on aller aujourd'hui ?

Certains projets se distinguent par leur capacité à exploiter pleinement les stratégies passives pour améliorer le confort thermique et réduire la consommation énergétique.

Ces exemples montrent comment, grâce à une conception intelligente, l'orientation des bâtiments, le choix des matériaux et l'intégration de ces dispositifs comme la ventilation ou l'éclairage naturel, il est possible de limiter l'usage des systèmes actifs. Ils offrent ainsi un cadre concret pour réfléchir aux limites et aux potentialités de l'architecture passive dans le contexte contemporain, tout en inspirant de nouvelles solutions adaptées aux différentes contraintes climatiques et fonctionnelles.

I.3.2.1 L'Héliotrope

L'Héliotrope est la première maison à énergie positive au monde. Ce bâtiment pensé par Rolf DISCH a été construit en 1994 à Fribourg, c'est la première maison avec un bilan énergétique positif. Autrement dit elle produit 3 fois plus d'énergie qu'elle n'en consomme.

Pour en arriver à un tel bilan Rolf DISCH a exploité de nombreux dispositifs passifs.

Cette maison est construite autour d'un axe rotatif qui lui permet de tourner sur elle-même pour suivre le soleil en hiver et pour s'en protéger l'été. Cela permet également de se positionner selon le vent pour favoriser la ventilation naturelle. La végétation est pensée pour créer un filtre en cas de trop forte chaleur. Les murs intérieurs sont en béton brut pour accumuler la chaleur la journée et la restituer la nuit. S'ajoute à cela une enveloppe correctement isolée pour créer un confort thermique stable. De plus, le triple vitrage à haute performance permet également de filtrer les apports solaires. Sur la toiture des panneaux photovoltaïques et des capteurs thermiques solaires ont été mis en place pour exploiter les rayonnements du soleil. Cela permet une production supérieure à la consommation annuelle du bâtiment, c'est pourquoi on peut parler de bâtiment à énergie positive⁴².

42 HARLOT-VALDIEU, Catherine et OUTREQUIN, Philippe. Bâtiments passifs tertiaires. Éditions Le Moniteur, 2017. [impacts-alps/](#), consulté le 24 novembre 2024.

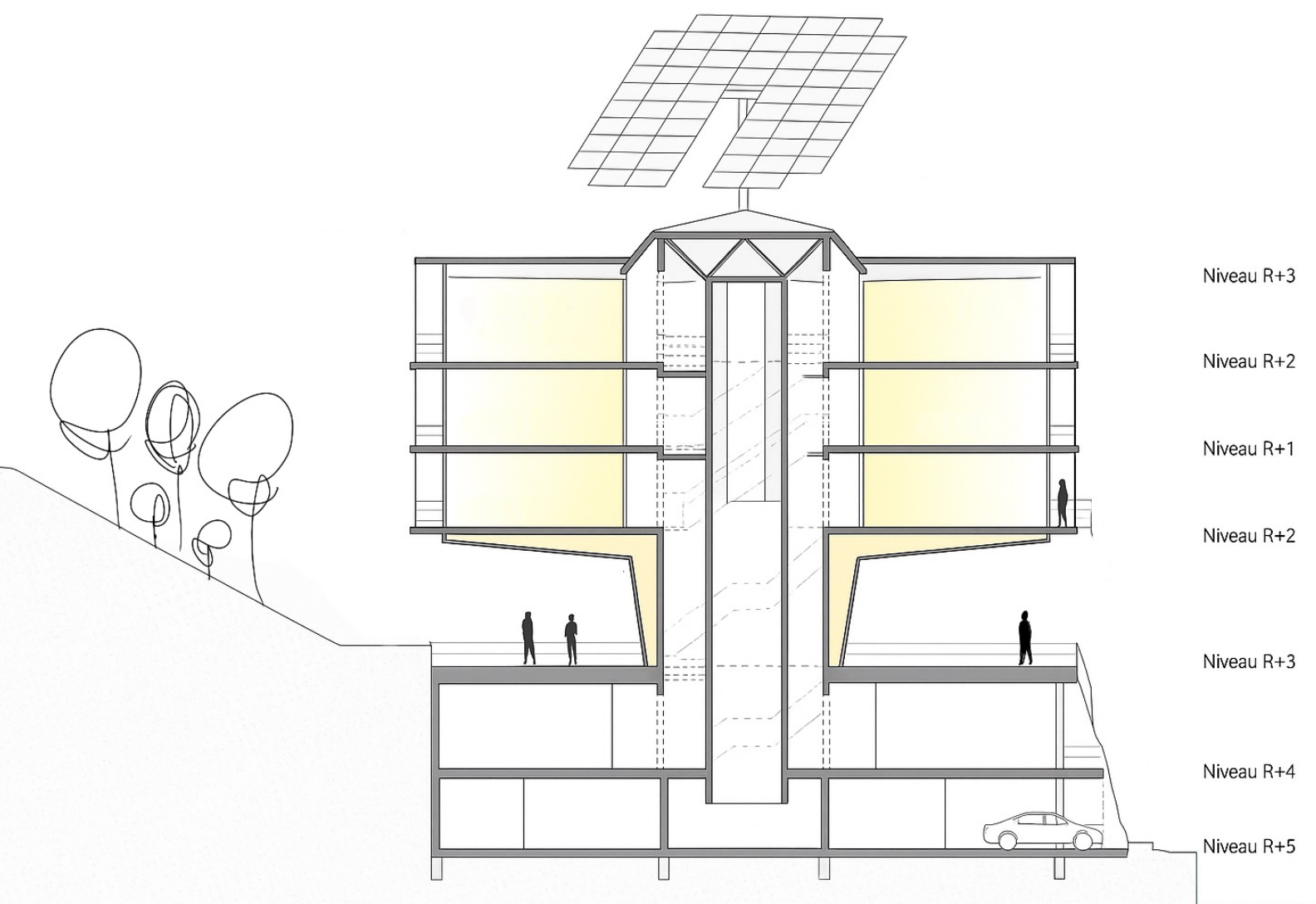


Figure 20 : Coupe Schématique de l'héliotrope
Redessiné par l'auteur

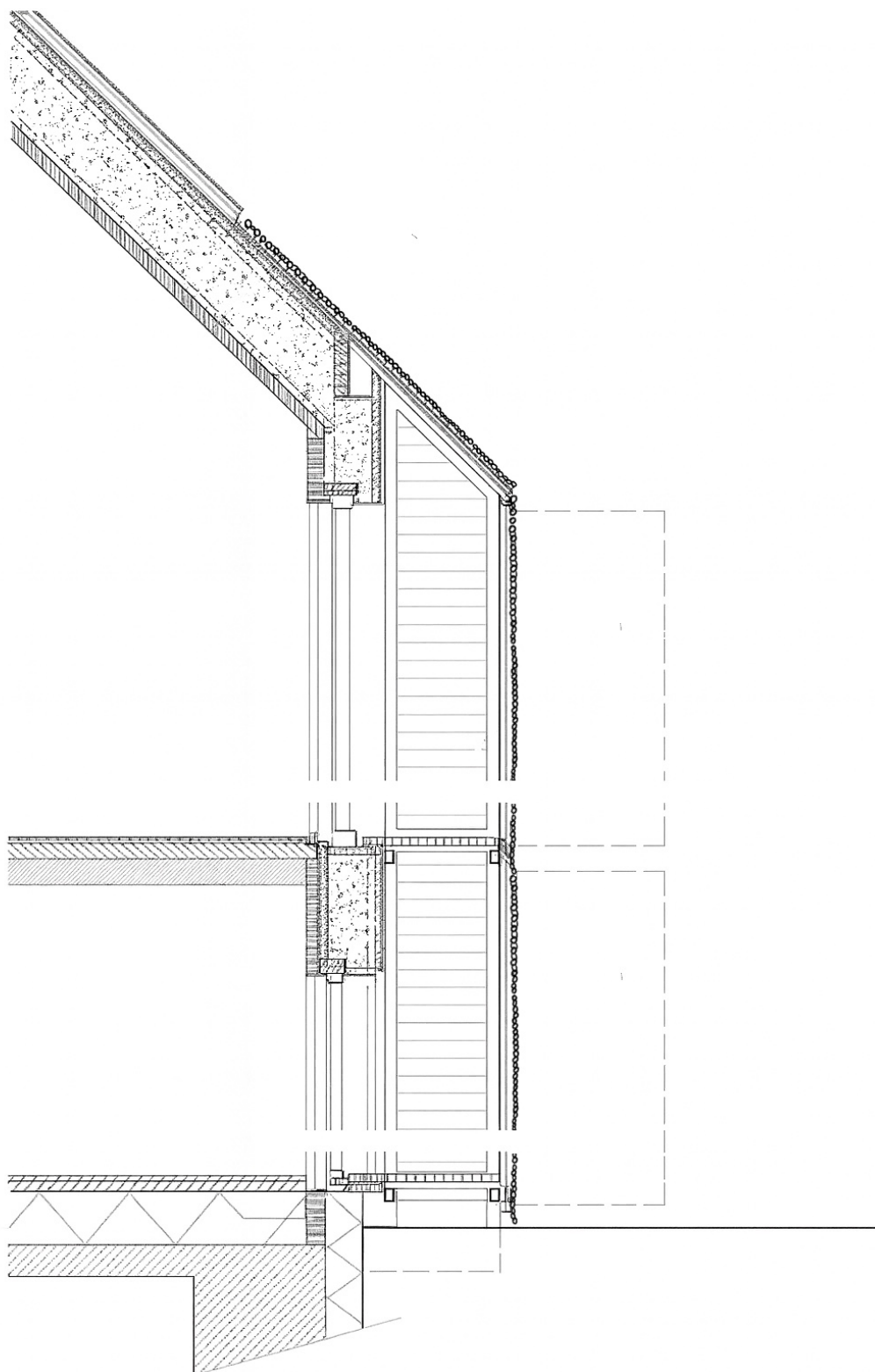


Figure 21 : Coupe détails de la maison bambou
Redessiné par l'auteur

I.3.2.2 La Maison Bambou

Un autre projet remarquable est la maison Bambou située dans le Val d'Oise. Cette maison dessinée par Karawitz intègre elle aussi de nombreux dispositifs passifs. En effet son orientation solaire est pensée au millimètre près, la face sud est quasiment totalement vitrée pour maximiser les apports solaires en hiver, contrairement aux façades nord et ouest qui sont très peu ouvertes pour minimiser les déperditions thermiques. Une seconde peau a été pensée pour se protéger du soleil de l'été, il s'agit d'un brise soleil en bambou qui vient protéger la totalité de la maison si on le souhaite.

Son enveloppe est faite à partir de fibres de bois ce qui permet une bonne isolation. Le duo enveloppe / façade permet une régulation naturelle de la température intérieure. La dalle intérieure est en béton ce qui permet, comme dans l'Héliotrope d'accumuler la chaleur la journée et de la restituer la nuit. Cette dalle couplée au dispositif de double peau garantie un confort thermique aussi bien en été qu'en hiver ⁴³.

43 KARAWITZ Architecture (dir.). La Maison bambou – Bessancourt (95). Disponible en ligne : <https://lamaisondupassif.fr/la-maison-bambou-bessancourt-95-karawitz/>, consulté le 9 décembre 2024.

I.3.3 Pourquoi et comment combiner l'approche passive avec la terre crue

L'approche passive vise à réduire au maximum les besoins énergétiques d'un bâtiment en optimisant ses caractéristiques bioclimatiques dès la phase de conception. Elle repose sur des principes simples mais efficaces : orientation optimale, isolation performante, gestion des apports solaires, ventilation naturelle, compacité du volume et réduction des ponts thermiques. La terre crue, de son côté, est un matériau ancestral qui revient aujourd'hui au cœur des préoccupations écologiques grâce à ses qualités thermiques, hygrorégulatrices et environnementales. Croiser ces deux logiques – passif et terre crue – permet de répondre à un double objectif : assurer un confort thermique optimal et réduire l'impact environnemental de l'architecture.

I.3.3.1 Une complémentarité évidente

Comme nous l'avons déjà évoqué la terre crue possède une inertie thermique remarquable : elle absorbe la chaleur pendant la journée, la stocke, puis la restitue particulièrement lentement durant la nuit. Dans les climats où les écarts de température sont marqués entre le jour et la nuit (comme en zone alpine ou cévenole), cette propriété est précieuse pour maintenir une température intérieure stable. À l'inverse, un matériau léger comme le béton cellulaire ou le bois présente peu d'inertie, rendant l'intérieur plus vulnérable aux variations extérieures.

De plus, la capacité hygroscopique de la terre crue – sa faculté à absorber l'humidité ambiante et à la restituer lorsque l'air devient plus sec – permet de stabiliser le taux d'humidité intérieure. Cela réduit le recours à des systèmes de ventilation mécanique ou de régulation d'humidité, renforçant la logique passive.

I.3.3.2 Adapter l'approche passive au matériau terre

Contrairement à des matériaux industriels standards, la terre crue impose des choix architecturaux spécifiques. Elle nécessite souvent des murs épais, une attention accrue à la protection contre l'eau (débord de toit, soubassement en pierre ou béton de chaux, enduits spécifiques) et un rythme de chantier plus lent. Ces contraintes peuvent être transformées en atouts si elles sont pensées dès la conception dans une logique bioclimatique.

Par exemple, dans un bâtiment passif en terre crue :

Une façade sud largement vitrée peut permettre de capter la chaleur du soleil en hiver. Les murs en pisé ou BTC accumulent cette chaleur et la redistribuent lentement, jouant un rôle de « radiateur passif ». En été, des brise-soleils, casquettes ou plantations feuillues évitent la surchauffe, pendant que les murs conservent la fraîcheur nocturne.

La ventilation naturelle est assurée par des ouvertures traversantes ou des patios, renforçant la performance thermique sans besoin d'énergie.

I.3.3.3 Un choix stratégique dans un contexte de transition

Dans une époque marquée par la crise énergétique et les exigences croissantes des réglementations thermiques (RT2012, RE2020), combiner terre crue et stratégie passive est non seulement pertinent, mais presque inévitable. La RE2020 valorise les matériaux biosourcés et géosourcés, tout en intégrant la notion de confort d'été. La terre crue répond à ces deux critères, et son usage dans des bâtiments passifs s'inscrit parfaitement dans les objectifs de neutralité carbone.

Ainsi, cette alliance entre matière et stratégie est une réponse à la fois technique, écologique et culturelle. Elle permet de concevoir des bâtiments adaptés aux contextes locaux, tout en anticipant les défis climatiques à venir.

I.3.3.4 Exemples et expérimentations

Des projets comme la maison de Martin Rauch dans les Alpes Autrichiennes, montrent que l'on peut atteindre un excellent confort thermique avec la terre crue même en climat froid, en combinant matériaux locaux, inertie et conception bioclimatique. De même, le centre Aria de Philippe Madec en Occitanie démontre la pertinence de cette alliance dans un climat humide, en prenant soin de protéger les murs en terre par des toitures bien débordantes et une élévation suffisante du soubassement. Ces exemples montrent que la terre crue ne doit pas être pensée comme un matériau du passé, mais comme un levier de transition vers une architecture durable, contextuelle et résiliente.



I.4- Étude de cas : analyse

I.4.1 La maison de Martin Rauch dans les Alpes Autrichiennes

I.4.1.1 Présentation du projet et de son contexte climatique

La maison de Martin Rauch se situe à Schlins, dans le Vorarlberg Autrichien, une région montagneuse soumise à un climat continental humide. Ce climat se caractérise par des hivers longs, rigoureux et enneigés, et des étés tempérés à chauds, souvent accompagnés de précipitations orageuses. L'humidité ambiante est présente une grande partie de l'année, ce qui soulève des enjeux spécifiques en matière de confort thermique et de qualité de l'air intérieur.

Dans ce contexte, Martin Rauch, spécialiste reconnu de la construction en terre crue, a conçu sa propre maison comme un manifeste vivant de ses convictions. Le projet cherche à répondre de manière cohérente aux contraintes climatiques locales, tout en valorisant les ressources du territoire. Sa maison est à la fois un lieu d'habitation, un espace d'expérimentation et un témoignage d'une architecture sobre, écologique et profondément ancrée dans le lieu.

I.4.1.2 Analyse des techniques mises en œuvre

L'ensemble du projet repose sur une approche bioclimatique et frugale, qui combine des savoir-faire traditionnels avec des exigences contemporaines de confort et de durabilité.

La maison est construite majoritairement en pisé, technique qui consiste à compacter de la terre crue dans des coffrages. La terre provient directement du site, ce qui limite l'impact carbone lié au transport. Les murs porteurs, épais, offrent une bonne inertie thermique et participent au maintien d'une température stable à l'intérieur.

Pour protéger ses façades de l'érosion, Martin Rauch a conçu un système de bandes, il intègre des briques horizontales à la surface des murs. Ces éléments permettent d'arrêter, ou du moins de ralentir, la course des gouttes de pluie, limitant ainsi l'impact direct de l'eau sur la terre crue et préservant la durabilité des façades.

En complément de la terre crue, Martin Rauch utilise du bois local, notamment pour les planchers, les menuiseries et la toiture. Les finitions intérieures sont réalisées avec des enduits naturels, à base d'argile, de caséine et d'huiles végétales. Ces matériaux permettent à la maison de respirer et favorisent un environnement intérieur sain.

Le bâtiment est orienté intelligemment afin de capter le soleil en hiver et d'éviter les surchauffes en été, grâce à des protections solaires passives. La ventilation naturelle est assurée par la disposition traversante des ouvertures, et les murs en terre jouent un rôle de tampon thermique.

La maison a été construite en grande partie avec des techniques artisanales, valorisant un savoir-faire local que Martin Rauch contribue à transmettre et à moderniser. La simplicité constructive va de pair avec une économie de moyens et une limitation des dispositifs techniques énergivores.

I.4.1.3 Le rôle de la terre crue dans la performance thermique en climat froid

L'étude de la maison de Martin Rauch, située à Schlins en Autriche, met en évidence la capacité de la terre crue à assurer un confort thermique durable, même dans un contexte de climat froid. Longtemps considérée comme un matériau réservé aux régions chaudes et sèches, la terre démontre ici qu'elle peut être tout aussi performante dans un environnement montagnard, à condition que sa mise en œuvre soit adaptée.

La première qualité de la terre crue réside dans son inertie thermique. Sa masse importante permet d'emmagasiner la chaleur produite en journée — qu'elle provienne du rayonnement solaire ou des apports internes — pour la restituer lentement durant la nuit. Cette régulation naturelle limite les variations de température entre le jour et la nuit, assurant une atmosphère intérieure stable et agréable, même lorsque les conditions extérieures sont rigoureuses. Dans un climat comme celui des Alpes Autrichiennes, où les amplitudes thermiques peuvent être fortes, cette propriété est essentielle.

La régulation hygrométrique de la terre crue constitue un second atout majeur. Grâce à sa nature hygroscopique, elle absorbe l'humidité lorsque l'air est saturé, puis la relâche lorsque celui-ci devient plus sec. Dans un climat humide comme celui de Schlins, cette capacité favorise un équilibre naturel du taux d'humidité intérieur, limitant les phénomènes de condensation et la sensation d'air froid. Elle contribue ainsi à un confort intérieur plus sain, sans recours à des dispositifs techniques complexes.

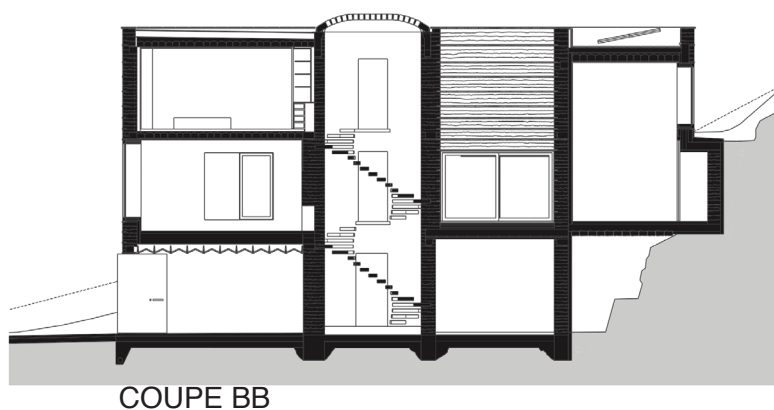
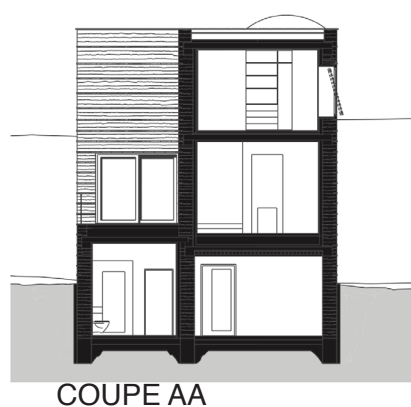
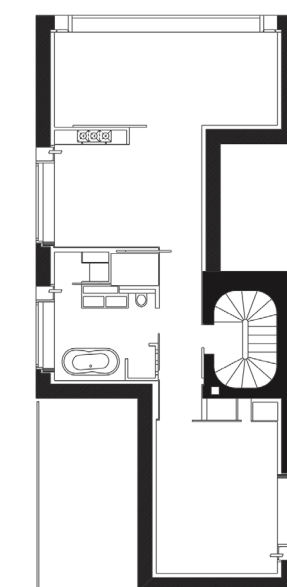
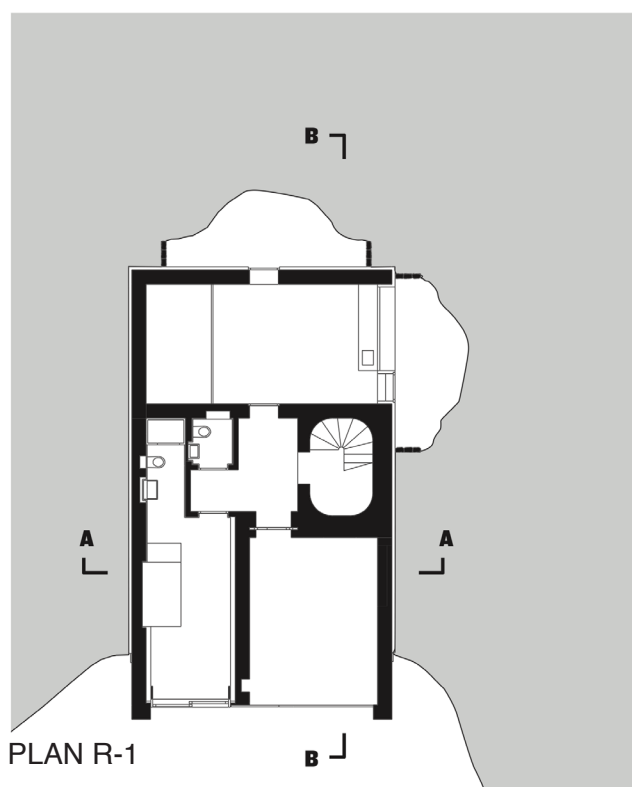


Figure 23 : Plan de la Maison de Martin RAUCH, Autriche
Redessiné par l'auteur

Sur le plan acoustique et sensoriel, les murs en pisé offrent une isolation naturelle et une ambiance intérieure apaisante. Leur texture, leur teinte et leur masse créent un rapport particulier à la lumière et à la chaleur, participant à une qualité d'habitat qui dépasse la simple performance énergétique.

Enfin, le projet de Martin Rauch illustre une approche écologique et locale du bâti. La terre utilisée provient directement du site, réduisant ainsi les besoins en transport et en transformation. En comparaison avec le béton, dont la production génère une forte empreinte carbone, la terre crue représente une alternative durable et peu énergivore, adaptée aux enjeux climatiques actuels.

Ainsi, même dans un environnement froid et humide, la terre crue prouve qu'elle peut garantir un confort thermique et hygrométrique de haut niveau, à condition d'être protégée et mise en œuvre selon les spécificités du climat. Ce projet démontre que la performance ne dépend pas uniquement de la technologie, mais aussi de la compréhension fine des matériaux et du contexte dans lequel ils s'inscrivent⁴⁴.

44 DETHIER, Jean. op.cit. page 406

Figure 24 : Maison de Martin RAUCH & la montagne autrichienne
Photographe : Beat Bühler





I.4.2 Le Pôle culturel Aria de Philippe Madec en Occitanie

I.4.2.1 Présentation du projet et son contexte climatique

Le Pôle culturel Aria, situé à Cornebarrieu en région Occitanie, met en avant une architecture engagée et résiliente. Conçue par l'architecte Philippe Madec, ce projet regroupe une médiathèque, un auditorium, une salle de spectacles et des espaces d'expositions. Cornebarrieu est un territoire influencé à la fois par le climat océanique et par le climat méditerranéen. Les étés sont souvent chauds, parfois caniculaires, tandis que les hivers restent doux mais humides, avec des précipitations réparties tout au long de l'année. Ce contexte imposait au projet de répondre à des enjeux thermiques et hygrothermiques, sans recourir à la mécanique. S'ajoute à cela la position du site en zone inondable, qui nécessitait des choix constructifs et architecturaux spécifiques pour gérer la montée potentielle des eaux.

L'objectif principal de cette conception est de garantir un confort thermique passif, tout en prenant en compte les spécificités locales, notamment l'humidité ambiante. Dans ce cadre, l'architecture doit permettre de maîtriser les variations de température entre le jour et la nuit, et de respecter les dynamiques naturelles du territoire, notamment la gestion de l'eau. Ce projet est un exemple de réponse architecturale adaptée aux enjeux climatiques contemporains.

I.4.2.2 Analyse des techniques mises en œuvre

Philippe Madec applique une approche fondée sur l'architecture frugale, reposant sur trois principes : sobriété, matérialité et performance passive. Plusieurs choix techniques ont été mis en œuvre pour répondre à ces exigences.

Surélévation sur pilotis

Le bâtiment est surélevé sur des pilotis, une solution qui répond directement à la contrainte de la zone inondable. Cette surélévation permet non seulement de libérer le sol pour que l'eau puisse circuler librement en cas de crue, mais elle crée également un socle ventilé par le dessous, contribuant ainsi à la régulation thermique et à la ventilation naturelle du bâtiment.

Matériaux locaux et biosourcés

Le choix des matériaux est basé sur une volonté de sobriété et de durabilité. Le projet privilégie le bois local pour la structure et certaines finitions, ainsi que des briques de terre crue (BTC), produites directement sur site, ce qui réduit considérablement l'empreinte carbone du bâtiment. L'utilisation de matériaux en terre cuite et en béton contribue à la solidité du projet, mais malheureusement, elle alourdit son empreinte carbone.

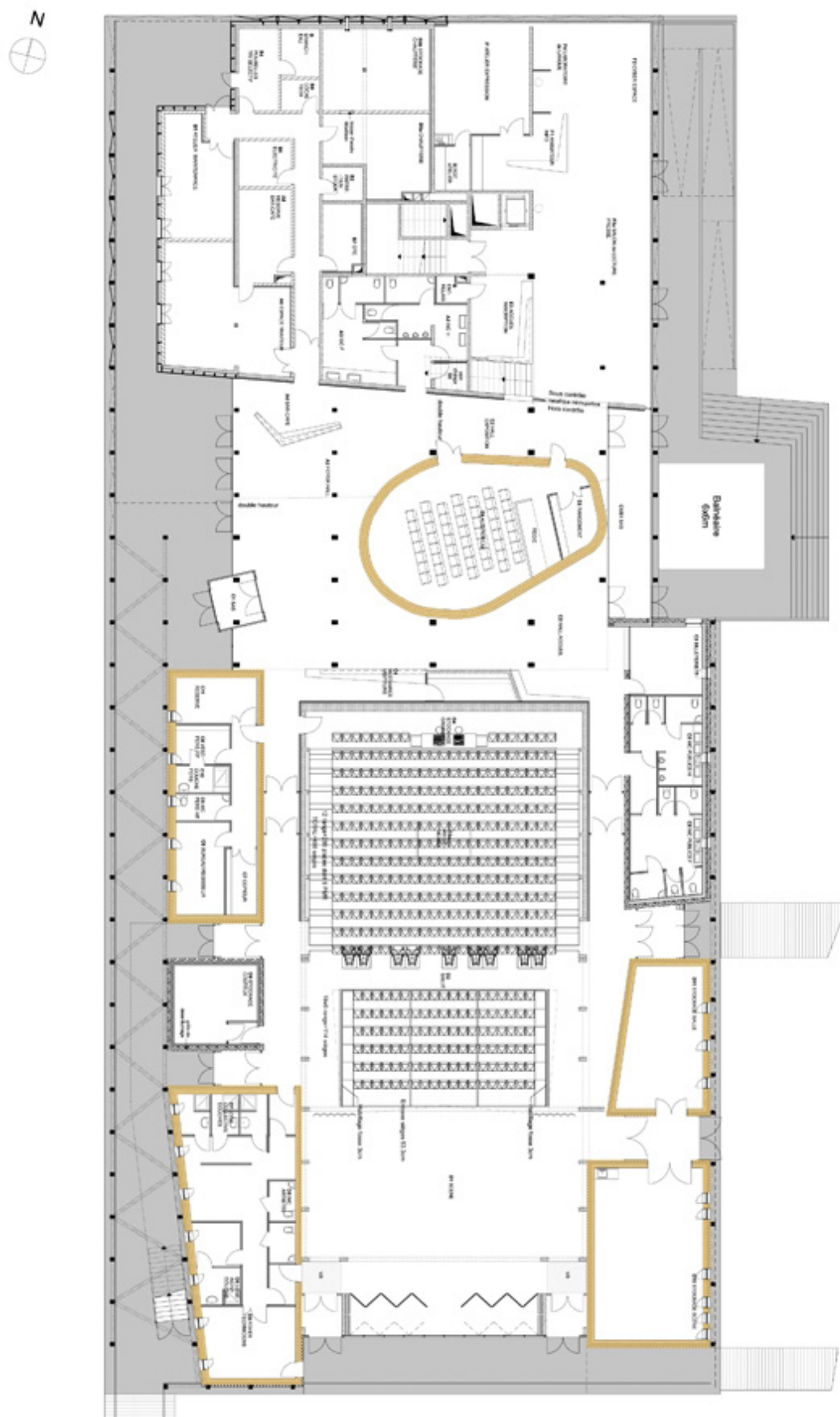


Figure 25 : Plan du Pôle Aria de Philippe Madec, Cornebarrieu



Stratégie bioclimatique

La conception bioclimatique est au cœur du projet. L'orientation du bâtiment est optimisée pour capter un maximum de lumière naturelle en hiver, tout en se protégeant des apports excessifs de chaleur en été. Des protections solaires et des cheminées de ventilation naturelle en toiture permettent de garantir une régulation thermique sans avoir recours à des systèmes énergivores. Les matériaux massifs, en particulier la terre crue, contribuent à une inertie thermique élevée, indispensable pour maintenir une température stable à l'intérieur.

Toiture accessible et paysagère

Le projet intègre également une toiture végétalisée, qui joue un rôle clé dans la gestion thermique estivale. Elle offre un espace de lecture et de détente, tout en favorisant la gestion des eaux pluviales et en renforçant l'intégration du bâtiment dans son environnement. Ce choix, en plus d'être esthétiquement agréable, prolonge le paysage tout en apportant un confort supplémentaire pendant les périodes de chaleur ⁴⁵.

I.4.2.3 Le rôle de la terre crue dans la performance thermique en climat humide

L'une des spécificités les plus remarquables du Pôle Aria réside dans l'usage de la terre crue comme matériau principal dans certaines parties du bâtiment, notamment l'auditorium et les parois internes. Cette utilisation de la terre crue, est ici un choix structuré et innovant dans le cadre d'un établissement recevant du public.

Comportement thermique

La terre crue est un matériau qui possède une forte inertie thermique lorsque l'écart de températures est important entre la journée et la nuit, il est essentiel d'avoir un matériau aussi performant que la terre crue pour garantir le confort dans un climat où l'humidité est omniprésente.

Avantage en climat humide

Contrairement à certains matériaux isolants synthétiques, la terre crue permet au bâtiment de respirer : elle ne retient pas l'humidité de manière excessive et évite ainsi les phénomènes de condensation ou de moisissures. Grâce à sa capacité hygroscopique, la terre crue régule naturellement l'humidité ambiante, sans recours à des dispositifs mécaniques.

⁴⁵ LE MONITEUR. À la conquête d'un pôle culturel. Le Moniteur, n° 5959, 19 janvier 2018, Figure 26 : Pôle Aria de Philippe Madec
Photographe : Pierre Yves BRUNAUD

Autres bénéfices

Outre ses qualités thermiques et hygrométriques, la terre crue présente également un avantage acoustique important. En effet, elle absorbe une partie des sons, ce qui améliore le confort sonore dans les espaces tels que l'auditorium ou les salles de spectacles. Son esthétique chaleureuse et sa sensation tactile participent également à l'identité du bâtiment, en créant une atmosphère agréable et sensorielle.

Enfin, l'usage de la terre crue contribue à une réduction significative de l'empreinte carbone du projet, en raison de sa faible énergie grise et de sa production locale. Elle incarne ainsi une approche durable et résiliente, tout en permettant de se réapproprier un matériau traditionnel dans une démarche contemporaine.

Le Pôle Aria de Philippe Madec constitue un exemple parfait de réponse architecturale innovante face aux enjeux climatiques et environnementaux contemporains. L'intégration de la terre crue dans ce projet, tant pour ses qualités thermiques et hygrométriques que pour ses avantages acoustiques et esthétiques, montre qu'il est possible d'allier performance, confort et durabilité sans avoir recours à des technologies complexes. Cette architecture frugale, ancrée dans son territoire, illustre une manière de concevoir les bâtiments publics en respectant les dynamiques naturelles et en offrant des espaces de qualité, adaptés aux réalités climatiques locales.

Figure 27 : Détails du Pôle Aria de Philippe Madec
Photographe : Pierre Yves BRUNAUD



I.4.3 Comparaison des deux projets

I.4.3 .1 Performances thermiques et adaptation climatique

La maison de Martin Rauch est située en altitude, dans un climat continental Alpin. Les hivers y sont froids, longs et humides, tandis que les étés restent relativement modérés. Rauch utilise la terre crue sous forme de pisé porteur, avec des murs très épais qui assurent une stabilité thermique en hiver. La terre permet de garder une température confortable malgré les écarts importants entre le jour et la nuit. Elle joue aussi un rôle de régulateur hygrométrique naturel, ce qui est précieux dans un climat de montagne.

À l'inverse, le projet de Philippe Madec se situe en Occitanie, dans un climat chaud et humide, avec des hivers doux mais parfois aussi humides, et des étés souvent caniculaires. Le bâtiment étant implanté en zone inondable, des dispositifs spécifiques ont été mis en place pour répondre à ces contraintes : pilotis, ventilation naturelle par le dessous, toiture végétalisée, etc. Dans ce contexte, la terre crue (sous forme de briques BTC) est utilisée principalement pour ses qualités d'inertie thermique et de régulation de l'humidité intérieure et de l'acoustique. Elle permet de lisser les fortes variations de température entre le jour et la nuit, tout en évitant les problèmes de condensation liés à l'humidité ambiante.

Les deux projets s'inscrivent dans une logique bioclimatique forte, mais chacun à leur manière. Madec adopte une approche pragmatique et innovante, adaptée à un bâtiment public complexe, qui regroupe médiathèque, salle de spectacles, auditorium et espaces d'expositions. Il utilise une combinaison de matériaux locaux, de dispositifs passifs (orientation solaire, sheds de ventilation, protections solaires), et de choix structurels adaptés à la zone inondable.

De son côté, Martin Rauch propose une vision beaucoup plus radicale. En tant qu'habitant et constructeur de sa propre maison, il a une grande liberté de conception. Il choisit une démarche artisanale, avec des matériaux bruts, locaux et biosourcés. Son projet est simple mais cohérent, avec une architecture totalement passive qui ne dépend d'aucune technologie lourde. La performance repose uniquement sur l'intelligence de la mise en œuvre, l'épaisseur des murs, l'orientation et la ventilation naturelle.

Ces deux projets expriment chacun à leur manière une forme d'écologie constructive. Le projet de Philippe Madec montre qu'il est possible de construire en terre crue dans le cadre d'un bâtiment public, avec toutes les contraintes techniques, normatives et programmatiques que cela implique. Il ouvre la voie à une architecture frugale et résiliente, même à grande échelle. Toutefois, la terre n'y est pas utilisée en structure principale, et certains dispositifs passifs nécessitent une mise en œuvre très rigoureuse pour rester efficaces.

La maison de Martin Rauch incarne une architecture plus radicale, presque expérimentale, qui pousse au maximum les qualités intrinsèques de la terre crue. C'est un projet très performant, mais difficilement reproductible à grande échelle. L'auto-construction et l'artisanat y tiennent une place centrale, ce qui en limite la portée en contexte urbain et/ou institutionnel.

Cette comparaison permet de comprendre que la terre crue n'est pas un matériau réservé aux climats secs ou aux constructions traditionnelles. Bien au contraire, elle peut s'adapter à des contextes climatiques très variés, à condition d'être pensée dans une logique globale de projet. Qu'elle soit utilisée en pisé massif ou en briques BTC, en structure porteuse ou en remplissage, elle révèle des qualités thermiques, hygrométriques et écologiques remarquables. Entre la rigueur artisanale de Rauch et la frugalité architecturale de Madec, ces deux projets aident à affiner la réflexion sur l'usage contemporain de la terre crue comme réponse possible aux enjeux environnementaux et climatiques actuels.



Ce premier chapitre permet de comprendre l'histoire, les techniques et les propriétés de la terre crue, ainsi que sa complémentarité avec l'approche passive dans la construction. Nous voyons que ce matériau, utilisé depuis la Préhistoire, s'est constamment adapté aux contextes climatiques, géologiques et culturels, et que son usage connaît un renouveau dans l'architecture contemporaine grâce à ses qualités thermiques, hygrorégulatrices et environnementales. Les exemples historiques, du Néolithique à l'époque actuelle, montrent que la terre crue peut répondre à des besoins variés, allant de l'habitat vernaculaire aux projets industriels modernes, tout en limitant l'impact environnemental.

Les propriétés spécifiques de la terre crue – inertie thermique, régulation hygrométrique, adaptabilité architecturale et faible empreinte carbone – en font un matériau particulièrement pertinent pour les constructions passives. La combinaison de ces logiques – passif et terre crue – permet de concevoir des bâtiments confortables, durables et respectueux de l'environnement, tout en répondant aux contraintes spécifiques des climats froids et humides, comme ceux des Alpes françaises.

Cette compréhension générale des techniques, performances et potentialités de la terre crue ouvre désormais la voie à une analyse plus ciblée des conditions climatiques et environnementales. Le chapitre 2 s'intéressera précisément à un bâtiment en terre, afin de déterminer comment adapter concrètement les techniques de construction en terre crue à ce territoire particulier et optimiser le confort thermique dans un contexte de climat froid et humide.





Figure 30 : Mur en pisé enduit, BAUEN

INTRODUCTION	
I- ÉTAT DE L'ART	
II- TEST & ANALYSE D'UN BÂTIMENT EN TERRE CRUE	
III- VERS UNE ARCHITECTURE EN TERRE CRUE ADAPTÉE ET DURABLE	
IV- CONCLUSION	
V- BIBLIOGRAPHIE	
VI- ANNEXES	

Dans le cadre de ce mémoire, nous poursuivons l'étude des performances de la terre crue en nous appuyant sur une approche à la fois théorique et expérimentale. L'analyse d'une étude de cas, complétée par des relevés de données thermiques et hygrométriques, permettra d'évaluer concrètement le comportement de ce matériau en climat froid. Cette démarche vise à mieux comprendre dans quelle mesure la terre crue peut répondre aux exigences contemporaines de confort et de durabilité.

II.1 Présentation du bâtiments équipés

II.1.1 Présentation du sites et du climats associés

Grenoble, située au cœur des Alpes françaises, bénéficie d'un climat de transition entre climat continental et climat montagnard. La ville est influencée à la fois par son altitude moyenne (environ 212 m pour le centre-ville) et sa position dans la vallée de l'Isère, entourée de montagnes.

Cette situation géographique entraîne des variations climatiques importantes selon les saisons, ainsi qu'une grande amplitude thermique annuelle.

L'hiver grenoblois est froid, avec des températures moyennes comprises entre -1 °C et 5 °C. Les nuits peuvent descendre régulièrement en dessous de 0 °C, notamment lors des vagues de froid, et les périodes de gel sont fréquentes. Les précipitations sont modérées mais peuvent se présenter sous forme de neige, surtout lorsque des flux froids en provenance des Alpes se combinent à l'humidité de la vallée. Le climat hivernal accentue le besoin en chauffage, rendant la performance thermique des bâtiments particulièrement importante.

Le printemps à Grenoble est une période de transition, avec un réchauffement progressif des températures. Les températures moyennes varient entre 7 °C et 17 °C. Mars peut encore connaître des journées froides, tandis qu'avril et mai voient des températures plus douces et des journées plus longues. Le printemps est également caractérisé par une humidité relative modérée, qui diminue progressivement à mesure que les températures augmentent.

L'été grenoblois est chaud, parfois très chaud, avec des températures moyennes oscillant entre 20 °C et 30 °C. Les vagues de chaleur peuvent faire grimper les températures au-dessus de 40 °C, particulièrement lors des périodes de canicule. L'humidité relative peut rester modérée, mais la sensation de chaleur peut être accentuée dans la vallée en raison de l'effet d'accumulation thermique. Les besoins en climatisation ou en ventilation passive deviennent alors importants.

L'automne tout comme le printemps est une période de transition, avec des températures moyennes comprises entre 10 °C et 18 °C. Septembre reste encore chaud, tandis qu'octobre et novembre apportent un refroidissement progressif. Cette saison est souvent marquée par des précipitations plus importantes, et l'humidité relative commence à augmenter à l'approche de l'hiver.

Grenoble est un terrain d'analyse qui a certaines particularités. En effet l'amplitude de température y est très importante. La ville connaît des écarts significatifs entre les températures négatives l'hiver et celles élevées l'été, allant parfois de -10°C à 40°C. De plus, la topographie de la vallée vient influencer, voir même accentuer, le phénomène de gel en hiver. En effet dans une vallée comme celle de Grenoble, l'air froid a tendance à descendre et à s'accumuler dans les zones basses pendant la nuit. Cela crée des « poches de gel » où les températures peuvent être beaucoup plus basses que sur les hauteurs environnantes. S'ajoute à cela la forme encaissée de la vallée qui limite le renouvellement de l'air, ce qui empêche la dispersion du froid⁴⁶.

De même en l'été, la vallée agit comme un "entonnoir" et bloque la chaleur. Le rayonnement solaire réchauffe le sol et l'air de la vallée, ce dernier reste piégé entre les montagnes. La nuit, la dissipation de la chaleur est moins efficace dans les vallées profondes, car l'air chaud a du mal à s'élever et à se renouveler. Cela prolonge les épisodes de chaleur, notamment lors des canicules. De la même façon, la vallée canalise les vents et peut parfois limiter les brises rafraîchissantes, ce qui accentue la sensation de chaleur en été.

La pluviométrie à Grenoble présente une répartition relativement équilibrée tout au long de l'année, bien que certaines périodes soient plus arrosées. Les précipitations annuelles moyennes se situent autour de 950 à 1 000 mm, ce qui correspond à un niveau modéré à élevé. Les mois les plus humides sont généralement mai, octobre et novembre, périodes où les perturbations atlantiques et méditerranéennes peuvent se croiser. En revanche, les mois d'hiver sont souvent plus secs, notamment en raison des épisodes anticycloniques fréquents qui limitent les précipitations mais favorisent le froid et les brouillards.

⁴⁶ Météo France FICHE CLIMATOLOGIQUE Statistiques 1991–2020 et records GRENOBLE – LVD (38) https://donneespubliques.meteofrance.fr/FichesClim/FICHECLIM_38538002.pdf consulté le 3 octobre 2025

L'humidité relative de l'air est généralement élevée en hiver, notamment dans la vallée où l'air froid et humide tend à stagner. Cette humidité accentue la sensation de froid et peut favoriser la formation de brouillards denses et persistants, particulièrement durant les matinées hivernales. En été, l'humidité diminue mais reste perceptible lors des épisodes orageux, fréquents en fin de journée après de fortes chaleurs. Ces orages, parfois violents, participent de manière importante au total annuel des précipitations.

La neige fait également partie du climat grenoblois, bien qu'elle soit de plus en plus irrégulière en raison du réchauffement climatique. En moyenne, on observe entre 10 et 20 jours de neige par an dans la vallée, mais la durée d'enneigement peut fortement varier selon les années. Les chutes de neige sont plus fréquentes dans les zones environnantes situées au-dessus de 400 à 500 m d'altitude, où elles peuvent persister plusieurs jours, voire plusieurs semaines. En ville, la neige fond souvent rapidement, mais son accumulation temporaire peut impacter la circulation et l'isolation thermique des bâtiments.

Enfin, la forme encaissée de la vallée influence également la répartition des précipitations. Les reliefs environnants, notamment la Chartreuse, le Vercors et Belledonne, accentuent les pluies sur leurs pentes, tandis que le centre de la vallée peut connaître des zones d'ombres pluviométriques. Ce phénomène contribue à la diversité microclimatique de l'agglomération grenobloise, où quelques kilomètres d'écart peuvent suffire à modifier sensiblement les conditions météorologiques⁴⁷.

En résumé, le climat de Grenoble se distingue par ses forts contrastes thermiques et sa situation topographique singulière, qui accentue aussi bien les épisodes de froid hivernal que les chaleurs estivales. Les variations d'humidité, de précipitations et d'ensoleillement imposent une réflexion fine sur l'isolation, la ventilation et le choix des matériaux. Grenoble constitue ainsi un terrain d'étude idéal pour explorer l'adaptation des bâtiments aux conditions climatiques variées.

47 Climat Grenoble Isère, <https://www.meteo-grenoble.com/climat> consulté le 10 octobre 2025

II.1..2 Présentation de La Maison 24 heures

Notre analyse porte sur la maison de terre située sur le campus de l'Université Grenoble Alpes (UGA) datant de 1986. Tout est parti d'un défi : prouver qu'il est possible de construire en terre de manière fiable et économique. Les années 1970 ont été marquées par l'émergence d'un mouvement écologique précurseur de celui que nous connaissons aujourd'hui. Des étudiants en architecture venant s'installer sur le territoire grenoblois découvrent alors des maisons en terre cuite, ce qui leur donne l'envie de participer au projet de la « Maison 24h ».

À l'époque, la région était réputée pour sa tradition de la terre cuite, et le projet de la Maison 24h s'inscrit également dans le cadre de l'opération « Grenoble, capitale de la terre en Isère ».

Le défi de cette maison prend rapidement de l'ampleur : chercheurs et étudiants s'allient pour construire la maison en seulement 24 heures. Le projet est lancé le 19 novembre 1986 au matin, et dès le soir, les murs sont montés. Le lendemain, les arcs et les coupoles prennent forme, et la toiture commence à être amorcée. Après 24 heures de travail réparties sur trois jours (trois fois huit heures), le projet se termine comme prévu le 21 novembre 1986 au soir⁴⁸.

À l'intérieur, tout est fait de terre, du sol au plafond. Ce projet, jumelé à un projet similaire au Rwanda, constitue une véritable prouesse. Il anticipe en quelque sorte la problématique du logement d'urgence, en démontrant qu'en 24 heures, il est possible de créer une maison entièrement en terre.

48 Archives de l'Université de Grenoble. Dossier Maison 24h. Grenoble, 1987

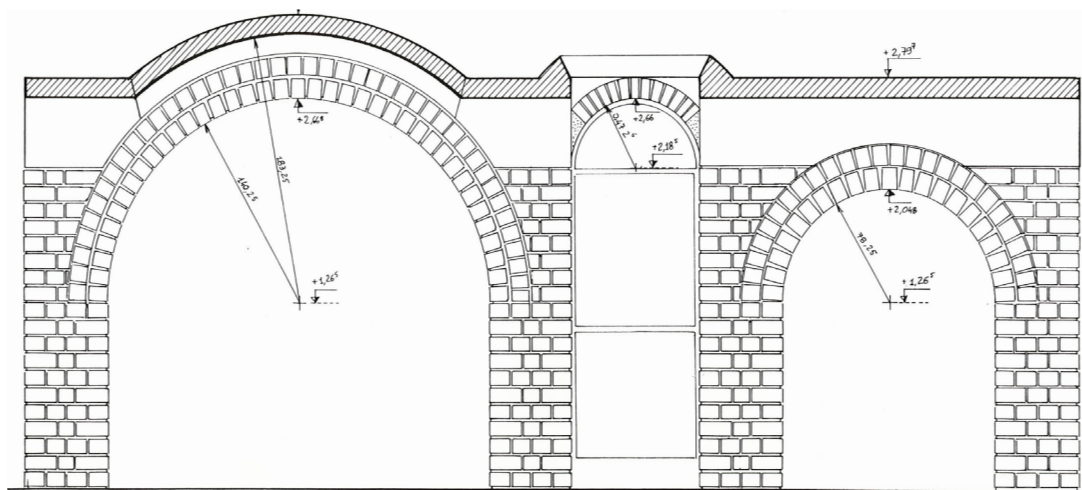
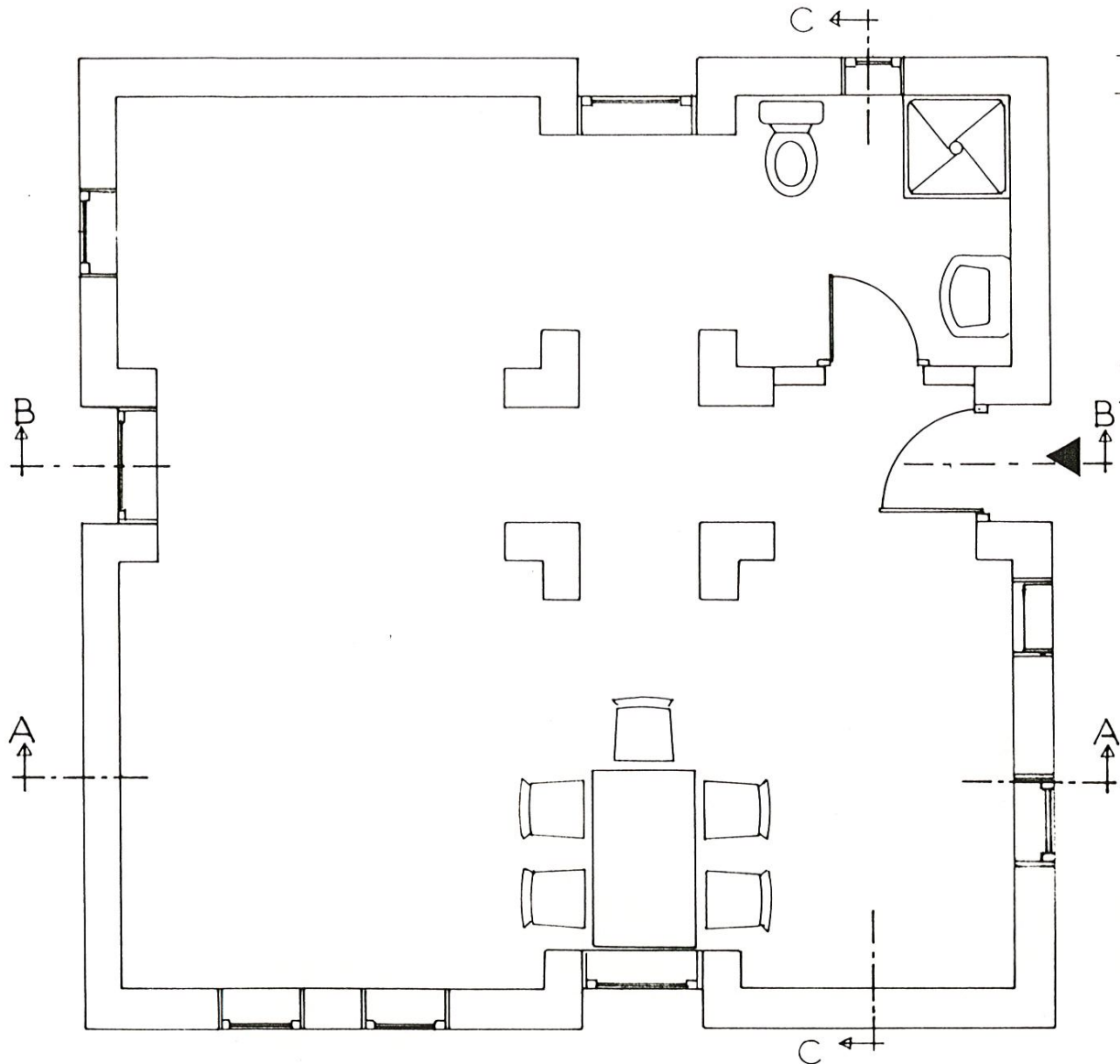


Figure 31 : Plan & Coupe d'origine de la Maison 24h

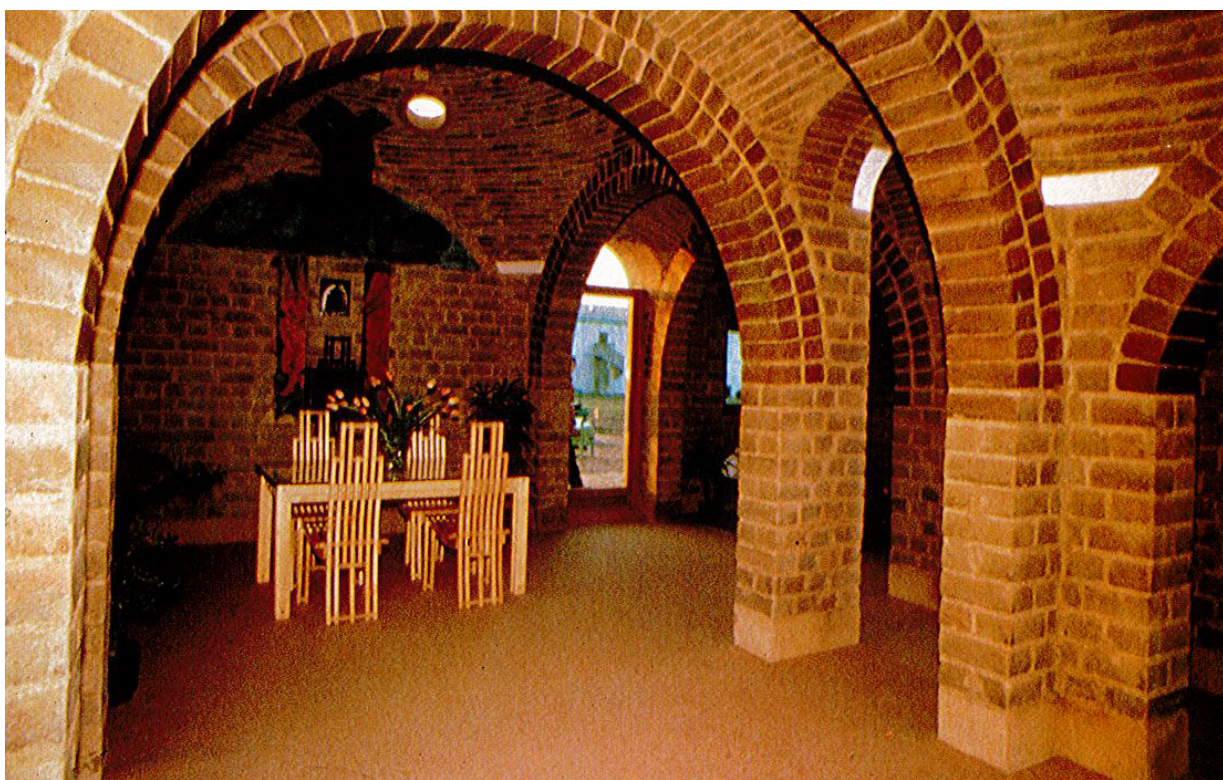


Figure 32 : Modélisation de la Maison 24h
Figure 33 : Photo intérieur de la Maison 24h en 1990

Plus de 20 000 briques compressées ont été nécessaires pour réaliser le projet. Pour gagner du temps et assurer la solidité, elles ont été stabilisées avec 8 % de ciment. Chaque brique, mesurant 29,5 cm de long, 14 cm de large et 8,5 cm d'épaisseur, a été réfléchi dans les moindres détails, deux briques dans la largeur se superposent parfaitement à deux briques posées dans la longueur (14cm+ 14cm+ joint= 29,5cm).

Quelques années plus tard, en 1989, une toile a été installée au-dessus du bâtiment pour protéger la toiture et limiter les pertes de chaleur. La maison est également reliée au réseau électrique la même année.

Avec le temps, l'inconfort à l'intérieur du bâtiment se fait ressentir : les occupants se plaignent du froid en hiver et de la chaleur en été. Les étudiants et chercheurs s'emparent alors du problème, c'est le point de départ du projet E-Colos en 2018.

Ils décident de ré-isoler seulement la toiture, par faute de moyen et de temps le bâtiment n'a pas pu être isolé dans son entièreté. Cette première phase de travaux commence par de nombreux tests en laboratoire pour sélectionner un matériau naturel, accessible localement, léger et isolant. Cette recherche aboutit à une brique de terre allégée, principalement composée de paille et d'argile. La paille, déchet agricole, est récupérée auprès des champs de blé environnants, et l'argile provient d'une boue de lavage fournie par l'entreprise CEMEX, issue de la carrière du Nord-Isère. Cette boue contient une quantité importante d'argile, permettant de réduire la proportion de terre dans la brique tout en conservant ses propriétés collantes.

Après validation et tests, la brique est produite lors du festival Grain d'Isère au Grand Atelier de l'Isle d'Abeau en mai 2023. Quelques mois plus tard, un chantier participatif a lieu sur le campus de l'UGA, du 26 juin au 7 juillet 2023, pour rénover la toiture.

Pour la mise en œuvre, ces briques ont été liées à la toiture existante avec un mortier de 12 cm d'épaisseur. Des joints ont été réalisés entre chaque brique pour limiter les pertes thermiques. Enfin, un enduit de terre, composé d'un tiers de sable, d'un tiers de terre et d'un tiers de fibres, a été appliqué et armé avec de la toile de jute et de la fibre de verre. Le chantier s'interrompt pendant un mois et demi pour permettre le séchage de la toiture, puis, en septembre, la dernière couche composée de sable et de chaux est appliquée⁴⁹.

⁴⁹ Explication d'un étudiant du projet

À la suite de cette rénovation l'université affirme que la consommation électrique a diminué de presque 50 %. Une étude a été menée par des étudiants. Cette étude porte sur les années 2018 jusqu'à 2023. Ils se sont appuyé sur les Degrés Jours Unifié, la différence entre la température extérieure et une température de référence. Cette notion permet de réaliser des estimations de consommations d'énergie thermique pour maintenir un bâtiment confortable proportionnellement à la rigueur de l'hiver ou de la chaleur de l'été.

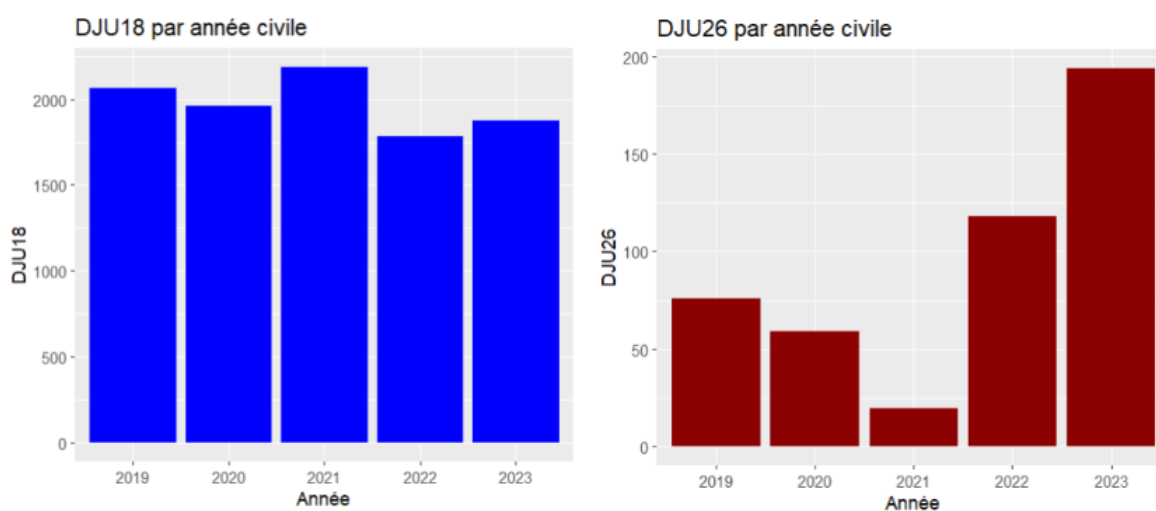


Figure 34 : Graphique des DJU par an, UGA

Sur le graphique en bleu, on représente le DJU de chauffage, c'est à dire le nombre d'heures où la température est inférieure à 18 °C, le chauffage est donc nécessaire pour le confort. On constate que l'année 2021 est la plus froide, tandis que 2022 et 2023 présentent des températures sensiblement similaires et plus douces.

Sur le graphique en bordeaux, on représente le DJU de climatisation soit le nombre d'heures où la température dépasse 26 °C, adaptation non normalisée de la définition classique des DJU. En termes de confort de climatisation, l'année 2023 se distingue comme particulièrement chaude, alors que 2021 reste l'année la plus fraîche.

En rapportant la consommation électrique en fonction des saisons, on compare ces données avant été après l'isolation de la toiture.

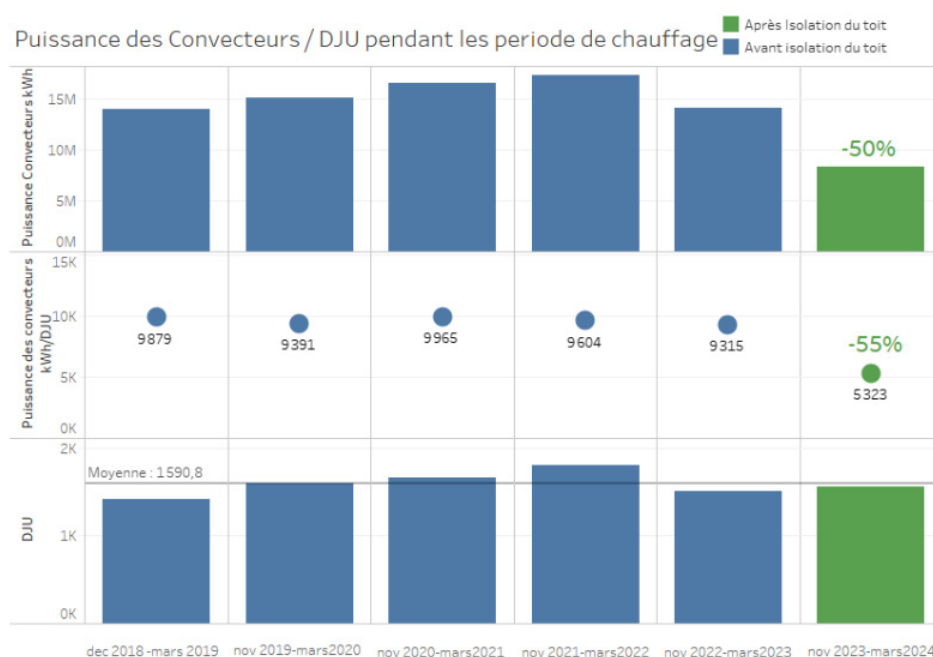


Figure 35 : Graphique de la consommation par an, UGA

Le rapport entre les deux données se lie dans la zone centrale du graphique : 5 kW/DJU en 2024, contre environ 10 kW/DJU pour les années précédentes. La consommation a donc nettement diminué depuis l'ajout de briques de terre allégées⁵⁰.

⁵⁰ e-CoLoS!! : quand l'innovation étudiante réduit de moitié la consommation de chauffage de la Maison en terre du campus UGA, publié le 26 août 2024, <https://www.univ-grenoble-alpes.fr/actualites/a-la-une/actualites-formation/e-colos-quand-l-innovation-etudiante-reduit-de-moitie-la-consommation-de-chauffage-de-la-maison-en-terre-du-campus-uga-1460920.kjsp> consulté le 1 octobre 2025

II.1.3 Ressenti face au confort thermique sur place (témoignage)

À l'heure actuelle, et depuis plusieurs années maintenant, la maison 24h s'est transformée en bureaux et est occupée par une partie de l'administration de l'Université de Grenoble. Ce changement de fonction facilite notre analyse puisque les besoins sont similaires toute l'année contrairement à une habitation.

Afin de comprendre l'ambiance intérieure de la maison 24h, j'ai souhaité recueillir les ressentis des personnes qui y travaillent régulièrement. J'ai eu la chance de m'entretenir avec Marie Besson, Elif Bagdad et Nathalie Masnada. Ces retours permettent d'avoir une vision plus sensible du confort et de l'ambiance intérieure du bâtiment.

L'ambiance générale

Les trois usagers décrivent une atmosphère agréable et apaisante, associée à un sentiment de cocon. Marie Besson évoque « *une ambiance très saine, très cocon* », tandis qu'Elif Bagdad parle d'« *une impression de cocon, d'un lieu chaleureux* ». Toutes deux expriment une satisfaction à travailler dans un bâtiment en terre, qu'elles considèrent comme un lieu privilégié et original. Nathalie Masnada partage ce ressenti, en soulignant le caractère unique du bâtiment : « *Quand je dis que je travaille à la maison en terre, tout le monde la connaît. J'aime raconter son histoire, c'est différent d'un bureau classique.* »

Le bruit et le silence

Sur le plan acoustique, les avis s'accordent : le bâtiment présente une résonance particulière, notamment au niveau des voûtes. Marie Besson parle « *d'un écho de voix à certains endroits* », tandis qu'Elif Bagdad remarque que « *le son résonne beaucoup* ». Nathalie Masnada précise que « *le mouvement du son est amplifié par endroits, ce qui peut gêner les échanges* ». Cette résonance semble liée à la forme intérieure du lieu, caractéristique des architectures voûtées.

Les périodes de chaleur et de froid

Concernant le confort thermique, les retours sont plus nuancés. Les trois usagères s'accordent sur le fait que le bâtiment est mal isolé : il fait très chaud l'été et froid l'hiver. Marie Besson indique que « *les radiateurs ont dû être changés* » et qu'« *une climatisation portable a été installée* ». Elif Bagdad mentionne des températures pouvant « *monter jusqu'à 43 °C en été* ». Nathalie Masnada note aussi que « *les nombreuses ouvertures apportent le froid en hiver et la chaleur en été* », ce qui témoigne d'un manque de régulation thermique malgré l'inertie naturelle du matériau. Néanmoins, toutes semblent conscientes que cette surchauffe est accentuée par la configuration du bâtiment et non par la seule matière terre.

Le rapport sensible au lieu

Au-delà du confort thermique, les témoignages traduisent une forte attache émotionnelle au bâtiment. Marie Besson décrit son expérience avec des mots poétiques : elle dit se sentir « *dans un hammam, une ruche, ou un nid d'oiseau* », évoquant une sensation de bien-être et de refuge. Elif Bagdad parle de chance et de plaisir à travailler dans un lieu « *original et différent des gros bâtiments* ». Nathalie Masnada met en avant l'esthétique intérieure, les courbes, les voûtes et le contact visuel avec la pierre, qui participent à son plaisir de travailler dans cet espace. Elle apprécie également la connexion directe à l'extérieur, les portes donnant sur la pelouse, et même la présence de petits animaux, qu'elle décrit avec amusement.

Synthèse des ressentis

Globalement, les témoignages révèlent une dualité :

D'un côté, un fort attachement esthétique et sensoriel au bâtiment, perçu comme un espace de travail inspirant, sain et singulier.

De l'autre, un inconfort thermique récurrent lié à l'isolation et aux variations saisonnières.

Ces retours confirment que la terre crue apporte une qualité d'ambiance et une dimension sensible dans les constructions contemporaines. Cependant, elles soulignent aussi la nécessité d'adaptations techniques (ventilation, menuiseries, protections solaires) pour répondre pleinement aux exigences actuelles de confort thermique⁵¹.

⁵¹ Entretiens en annexe

II.2 La Démarche

II.2.1 Présentation de la méthode

Pour mener à bien ce projet j'ai pris contact avec différents interlocuteurs, sachant de la terre crue. J'ai commencé par contacter CRAterre et Amaco. Grâce à eux, je suis entrée en contact avec Monsieur Joffroy, le directeur de l'Unité de Recherche AE&CC (Architecture, Environnement & Cultures Constructives). J'ai eu le plaisir de m'entretenir avec lui et il m'a introduite auprès de Madame Daudon. Grâce ces différents entretiens, j'ai eu accès à de nombreuses informations concernant la maison de terre.

Cette maison en terre, petit bâtiment composé de coupoles, de voûtes et de murs entièrement en briques de terre, est équipée de capteurs répartis un peu partout.

Pour comprendre les bienfaits de la terre, nous allons analyser quatre périodes distinctes : deux vagues de froid et deux vagues de chaleur, avant et après l'isolation de la toiture.

À la suite de cette analyse j'ai récolté toute les données de cette maison de terre depuis 2018. J'ai eu accès à de nombreuses données, vitesse du vent (météo), température du mur, température perçue (E4000), Température (météo), température intérieure, température du toit, pluie (météo), pyranomètre kWh/m², puissance de la ventilation, puissance des convecteurs, humidité relative, humidité intérieure, énergie des convecteurs, CO₂ intérieur, luminosité avant (météo) et l'azimut (météo). J'ai dans un premier temps trié l'ensemble des données afin de ne conserver que celles qui m'intéressaient.

Pour les vagues de froid, j'ai recherché des périodes où les températures étaient généralement négatives. Cela m'a conduit à étudier la période du 18 au 26 janvier 2019 pour la première vague, et du 24 au 29 décembre 2023 pour la seconde.

Pour les vagues de chaleur, j'ai sélectionné des périodes présentant des températures supérieures à 40 °C : la première va du 13 au 25 juillet 2022, et la deuxième du 26 juillet au 2 août 2024.

Pour chacune de ces périodes, j'ai trié ces données manuellement sur Excel, en supprimant les valeurs aberrantes. Puis j'ai regroupé les températures extérieures et intérieures (côté nord et sud) ainsi que l'humidité relative extérieure et l'humidité intérieure côté nord. Enfin, je me suis intéressée à la consommation énergétique du bâtiment. J'ai récupéré les données du bâtiment et calculé la consommation par heure en kWh, que j'ai ensuite superposée aux températures intérieures et extérieures pour observer les corrélations.

Une fois ces données collectées, j'ai commencé à extraire certaines mesures statistiques, comme la moyenne, le maximum, le minimum, l'écart-type et la médiane, afin d'obtenir un aperçu clair et rapide de chaque période étudiée. Ensuite, j'ai créé des graphiques pour visualiser les données et faciliter leur comparaison.

II.2.2 Données

Après avoir trié l'ensemble des données à ma disposition, j'ai regroupé celles qui étaient les plus pertinentes pour mon analyse⁵².

II.2.2.1 18 au 26 janvier 2019

Pour la première phase d'étude, allant du 18 au 26 janvier 2019, j'ai pris en compte les températures extérieures, dont la moyenne est d'environ 2,2 °C. La température minimale enregistrée le 25 janvier 2019 à 1h02 atteint -2,3 °C, tandis que la maximale, observée le 20 janvier 2019 à 13h19, s'élève à 12,3 °C. La valeur médiane est de 1,8 °C et l'écart-type de 3,3 °C.

Concernant la température intérieure au Nord, la moyenne est de 18,7 °C, avec une température minimale de 17,3 °C relevée le 18 janvier 2019 à 9h31, et une température maximale souvent observée autour de 19,09 °C. La valeur médiane est de 18,63 °C et l'écart-type de 0,26 °C.

Pour la température intérieure au Sud, la moyenne est de 20,53 °C, avec une valeur minimale de 18 °C et une maximale atteignant 22,4 °C, également assez récurrente. La valeur médiane est de 20,43 °C et l'écart-type de 0,77 °C.

	Température extérieur	Température intérieur Nord	Température intéreieur Sud
Moyenne	2,223855422	18,65991968	20,53025442
Minimum	-2,3	17,3	18
Maximum	12,3	19,09	22,4
Ecart Type	3,299970966	0,257323986	0,768569397
Mediane	1,8	18,63	20,43

Figure 36 : Tableau récapitulatif des températures en Janvier 2019, produit par l'auteur

52 Data.gouv.fr. Ecolos_consumption. Entrepôt de données scientifiques, [consulté le 11 novembre 2025]. Disponible en ligne : https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/Ecolos_consumption

Je me suis aussi intéressée à l'humidité relative. Sur cette période, l'humidité extérieure moyenne est de 26,85 %, avec un minimum de 25 % et un maximum de 29 %. La valeur médiane est de 27 % et l'écart-type de 1 %.

L'humidité intérieure, quant à elle, présente une moyenne de 39,9 %, avec une valeur minimale de 37 % et une maximale de 44 %. La valeur médiane est de 40 % et l'écart-type de 1,96 %. Si l'on considère qu'un confort hygrométrique optimal se situe entre 40 % et 60 %, l'ambiance intérieure n'a été confortable que 34,2 % du temps durant cette période.

	Humidité relative	Humidité intérieur
Moyenne	26,84631861	39,89129853
Minimum	25	37
Maximum	29	44
Ecart Type	0,996752477	1,958860988
Mediane	27	40

Figure 37 : Tableau récapitulatif de l'humidité en Janvier 2019, produit par l'auteur

Enfin, j'ai analysé la consommation énergétique quotidienne du bâtiment. La consommation moyenne est de 150,86 kWh par jour, avec une valeur minimale de 142,13 kWh et une maximale de 161,70 kWh. La valeur médiane est de 150,05 kWh et l'écart-type de 7,17 kWh.

	Température extérieur	Consomation par min en kWh	Consomation par jour en kWh
Moyenne	2,223855422	0,103187952	150,866
Minimum	-2,3	0,073	142,125
Maximum	12,3	0,213	161,703
Ecart Type	3,299970966	0,010703283	7,165289846
Mediane	1,8	0,104	150,049

Figure 38 : Tableau récapitulatif de la Consommation énergétique en Janvier 2019, produit par l'auteur

II.2.2.2 13 au 25 juillet 2022

Pour la deuxième phase d'étude, qui s'étend du 13 au 25 juillet 2022, j'ai analysé les températures extérieures, dont la moyenne est d'environ 29,78 °C. La température minimale relevée est de 17,4 °C, tandis que la maximale, enregistrée le 22 juillet 2022 à 13h40, atteint 45°C. La valeur médiane est de 29,2 °C et l'écart-type de 6,37 °C.

Concernant la température intérieure au Nord, la moyenne est de 31,39 °C, avec une valeur minimale de 27,74 °C observée le 13 juillet 2022 à 8h00, et une maximale de 33,62 °C relevée le 20 juillet 2022. La valeur médiane est de 31,48 °C et l'écart-type de 1,21 °C.

Pour la température intérieure au Sud, la moyenne est de 31,42 °C, avec une température minimale de 26,32 °C et une maximale de 33,98 °C, fréquemment atteinte durant cette période. La valeur médiane est de 31,61 °C et l'écart-type de 1,46 °C.

	température extérieur	température intérieur Nord	température intérieur Sud
Moyenne	29,76872591	31,38888116	31,41955032
Minimum	17,4	27,74	26,32
Maximum	45	33,62	33,98
Ecart Type	6,365910944	1,205680722	1,459114624
Mediane	29,2	31,48	31,61

Figure 39 : Tableau récapitulatif des températures en Juillet 2022, produit par l'auteur

Je me suis également penchée sur l'humidité relative. Durant cette période, l'humidité extérieure présente une moyenne de 34,64 %, avec un minimum de 27 % et un maximum de 38 %. La valeur médiane est de 35 % et l'écart-type de 2,23 %.

L'humidité intérieure, quant à elle, affiche une moyenne de 43,82 %, avec une valeur minimale de 36 % et une maximale de 47 %. La valeur médiane est de 44 % et l'écart-type de 2,65 %. Si l'on considère qu'un confort hygrométrique optimal se situe entre 40 % et 60 %, l'ambiance intérieure a été confortable environ 93,2 % du temps durant cette période.

	Humidité relative	Humidité intérieur
Moyenne	34,63614458	43,82008032
Minimum	27	36
Maximum	38	47
Ecart Type	2,225775413	2,654900875
Mediane	35	44

Figure 40 : Tableau récapitulatif de l'humidité en Juillet 2022, produit par l'auteur

Enfin, j'ai analysé la consommation énergétique quotidienne du bâtiment. La consommation moyenne s'élève à 0,05 kWh par jour, avec une valeur minimale de 0,048 kWh et une maximale de 0,064 kWh. La valeur médiane est de 0,056 kWh et l'écart-type de 0,005 kWh.

	Température extérieur	Consomation par min en kWh	Consomation par jour en kWh
moyenne	29,76872591	0,000190629	0,054545455
minimum	17,4	0	0,048
maximum	45	0,008	0,064
écart type	6,365910944	0,001220284	0,004824182
médiane	29,2	0	0,056

Figure 41 : Tableau récapitulatif de la consommation énergétique en Juillet 2022, produit par l'auteur

II.2.2.3 24 au 29 décembre 2023

Pour la troisième phase d'étude, qui s'étend du 24 au 29 décembre 2023, j'ai analysé les températures extérieures, dont la moyenne est d'environ 4,04 °C. La température la plus basse a été enregistrée le 27 décembre 2023 à 6h30 avec -2 °C, tandis que la plus élevée, observée le 29 décembre 2023 à 12h55, atteint 15,2 °C. La valeur médiane est de 3,6 °C et l'écart-type de 4,47°C.

Concernant la température intérieure Nord, la moyenne est de 18,86 °C, avec une valeur minimale de 18,54 °C et une maximale, relevée le 29 décembre 2023, autour de 19,36 °C. La valeur médiane est de 18,81 °C et l'écart-type de 0,2 °C.

Pour la température intérieure Sud, la moyenne est de 19,63 °C, avec une température minimale de 18,78 °C et une maximale atteignant 20,86 °C, observée à plusieurs reprises sur la période. La valeur médiane est de 19,41 °C et l'écart-type de 0,57 °C.

	Température extérieur	Température intérieur Nord	Température intérieur Sud
Moyenne	4,045717593	18,86191551	19,62800347
Minimum	-2	18,54	18,79
Maximum	15,2	19,36	20,86
Ecart Type	4,466944041	0,199003539	0,574650677
Mediane	3,6	18,81	19,41

Figure 42 : Tableau récapitulatif des températures en Décembre 2023, produit par l'auteur

Je me suis également penchée sur l'humidité relative. Sur cette période, l'humidité extérieure moyenne est de 33,72 %, avec une valeur minimale de 32 % et une maximale de 37 %. La valeur médiane est de 33 % et l'écart-type de 1,33 %.

L'humidité intérieure, quant à elle, présente une moyenne de 49,43 %, avec un minimum de 48 % et un maximum de 53 %. La valeur médiane est de 49 % et l'écart-type de 1,27 %. En prenant en compte qu'un confort hygrométrique optimal se situe entre 40 % et 60 %, on peut dire que l'ambiance intérieure a été confortable durant 100 % de la période, contrairement à l'extérieur où l'air est resté plus sec.

	Humidité relative etxrérieur	Humidité intérieur
Moyenne	33,72280093	49,43113426
Minimum	32	48
Maximum	37	53
Ecart Type	1,330724982	1,272351974
Mediane	33	49

Figure 43 : Tableau récapitulatif de l'humidité en Décembre 2023, produit par l'auteur

Enfin, j'ai étudié la consommation énergétique quotidienne du bâtiment. La consommation moyenne est de 66,98 kWh par jour, avec une valeur minimale de 55,6 kWh et une maximale de 76,58 kWh. La valeur médiane est de 68,24 kWh et l'écart-type de 8,31 kWh.

	Température extérieur	Consomation par min en kWh	Consomation par jour en kWh
Moyenne	4,045717593	0,232694847	66,97733333
Minimum	-2	0,152	55,6
Maximum	15,2	0,368	76,576
Ecart Type	4,466944041	0,042542149	8,309621861
Mediane	3,6	0,232	68,224

Figure 44 : Tableau récapitulatif de la consommation énergétique en Décembre 2023, produit par l'auteur

II.2.2.3 26 Juillet au 2 Août 2024

Pour la dernière phase de cette d’étude, allant du 26 Juillet au 2 Août 2024, j’ai pris en compte les températures extérieures, dont la moyenne est d’environ 29,51 °C. La température minimale enregistrée le 26 juillet 2024 à 4h20 atteint 18,6 °C, tandis que la maximale, observée le 30 juillet 2024 à 14h45, s’élève à 42,88 °C. La valeur médiane est de 28,55 °C et l’écart-type de 6,04 °C.

Concernant la température intérieure au Nord, la moyenne est de 30,21 °C, avec une température minimale de 26,94°C relevée le 26 juillet 20124 à 8h55, et une température maximale souvent observée autour dans la soirée du 1 aout 2024 de 32,36 °C. La valeur médiane est de 30,42 °C et l’écart-type de 1,42 °C.

Pour la température intérieure au Sud, la moyenne est de 30,86 °C, avec une valeur minimale de 26,48°C et une maximale atteignant 33,24°C, également assez récurrente. La valeur médiane est de 31,14°C et l’écart-type de 1,55 °C.

	Température extérieur	Température intérieur Nor	Température intéreieur Sud
Moyenne	29,50953993	30,21147569	30,86104167
Minimum	18,6	26,94	26,48
Maximum	42,88	32,36	33,24
Ecart Type	6,043149759	1,42358299	1,555085043
Mediane	28,55	30,42	31,14

Figure 45 : Tableau récapitulatif des températures en Juillet 2024, produit par l'auteur

Je me suis aussi intéressée à l'humidité relative. Sur cette période, l'humidité extérieure moyenne est de 46,86 %, avec un minimum de 38 % et un maximum de 50 %. La valeur médiane est de 47 % et l'écart-type de 1,87 %.

L'humidité intérieure, quant à elle, présente une moyenne de 60,14 %, avec une valeur minimale de 54 % et une maximale de 62 %. La valeur médiane est de 61 % et l'écart-type de 1,73 %. Si l'on considère qu'un confort hygrométrique optimal se situe entre 40 % et 60 %, l'ambiance intérieure n'a été confortable que 40 % du temps durant cette période.

	Humidité relative	Humidité intérieure
Moyenne	46,86067708	60,1484375
Minimum	38	54
Maximum	50	62
Ecart Type	1,87010642	1,733583677
Mediane	47	61

Figure 46 : Tableau récapitulatif de l'humidité en Juillet 2024, produit par l'auteur

Enfin, j'ai analysé la consommation énergétique quotidienne du bâtiment. La consommation moyenne est de 0,028 kWh par jour, avec une valeur minimale de 0,00000042 kWh et une maximale de 0,056 kWh. La valeur médiane est de 0,028 kWh et l'écart-type de 0,039 kWh.

	Température extérieure	Consommation par min en kWh	Consommation par jour en kWh
moyenne	29,50953993	0,000180736	0,028000208
minimum	18,6	0	0,000000416
maximum	42,88	0,008	0,056
écart type	6,043149759	0,001188473	0,039597686
médiane	28,55	0	0,028000208

Figure 47 : Tableau récapitulatif de la consommation énergétique en Juillet 2024, produit par l'auteur

Toutes ces données m'ont donc conduite vers une analyse plus détaillée ci-après.

II.2.3 Analyse

Toutes ces données nous permettent d'analyser de façon assez large les comportements de ce bâtiment en terre.

II.2.3.1 hiver-hiver

Dans un premier temps, si on s'intéresse à comparer les deux périodes hivernale, autrement dit la première phase de janvier 2019 et la troisième phase de décembre 2023, on peut faire ressortir plusieurs relations intéressantes.

Pour commencer, les températures extérieures étaient plus basses en 2019 : on a une moyenne de 2,2 °C et une médiane de 1,8 °C, alors qu'en 2023 on relève une moyenne de 4,04 °C et une médiane de 3,6 °C. Malgré cela, les températures intérieures restent comparables, avec une moyenne de 19,09 °C pour la première période et 19,41 °C pour la troisième. Les médianes sont elles aussi très proches : 18,63 °C en 2019 et 18,81 °C en 2023.

En comparant les deux graphiques, on remarque qu'en 2019, la température intérieure Sud est légèrement supérieure à celle du Nord, alors qu'en 2023, les deux courbes se superposent presque parfaitement. Dans les deux cas, la température intérieure reste stable malgré les variations extérieures, ce qui est plutôt positif pour le confort thermique.

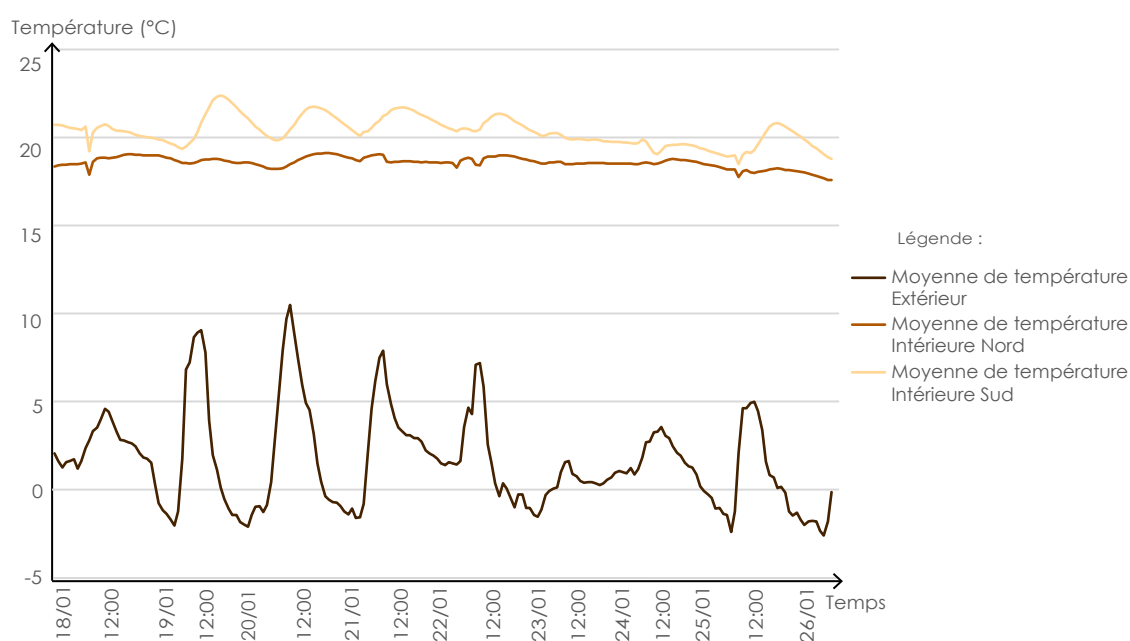


Figure 48 : Graphique représentant les températures en Janvier 2019, produit par l'auteur

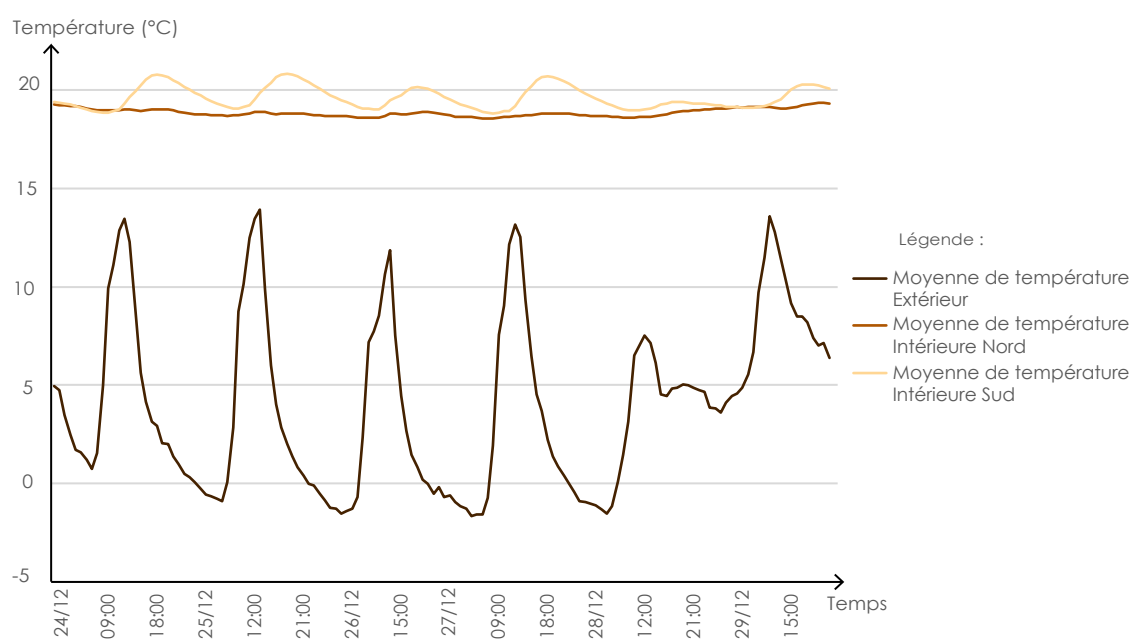


Figure 49 : Graphique représentant les températures en Décembre 2023, produit par l'auteur

On peut aussi s'intéresser au déphasage thermique. En 2019, le moment le plus froid à l'extérieur se situait autour de 4h du matin, tandis qu'à l'intérieur il survenait vers 9h. Pour le moment le plus chaud, il était observé à 13h à l'extérieur et vers 19h à l'intérieur.

Ce décalage montre bien la performance du matériau : il fait encore frais à l'intérieur quand les températures extérieures remontent, et inversement, la chaleur reste présente à l'intérieur quand il commence à faire plus frais dehors.

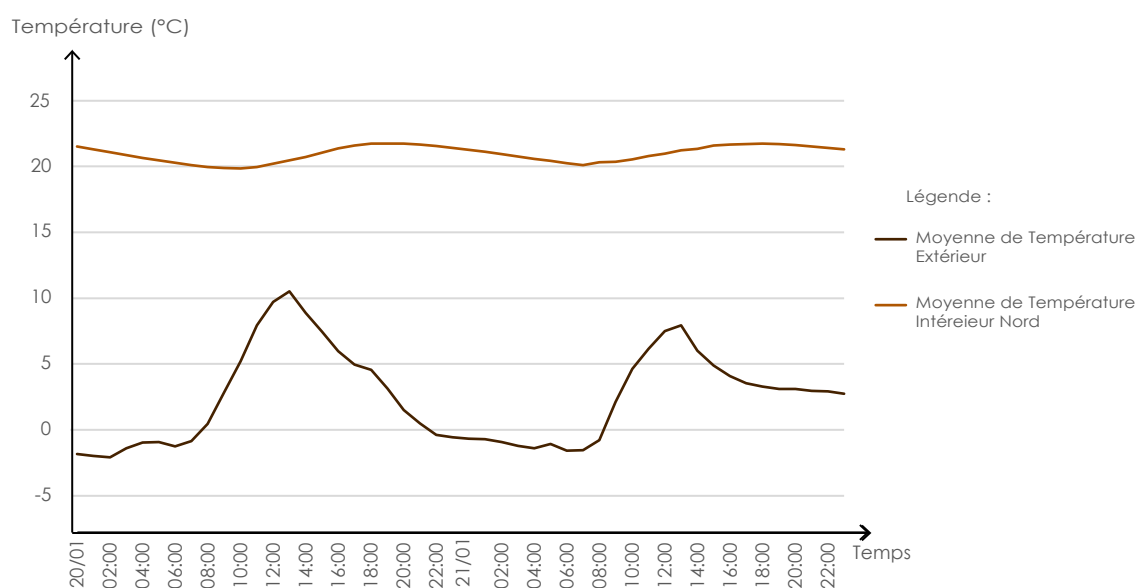


Figure 50 : Graphique représentant le déphasage en Janvier 2019, produit par l'auteur

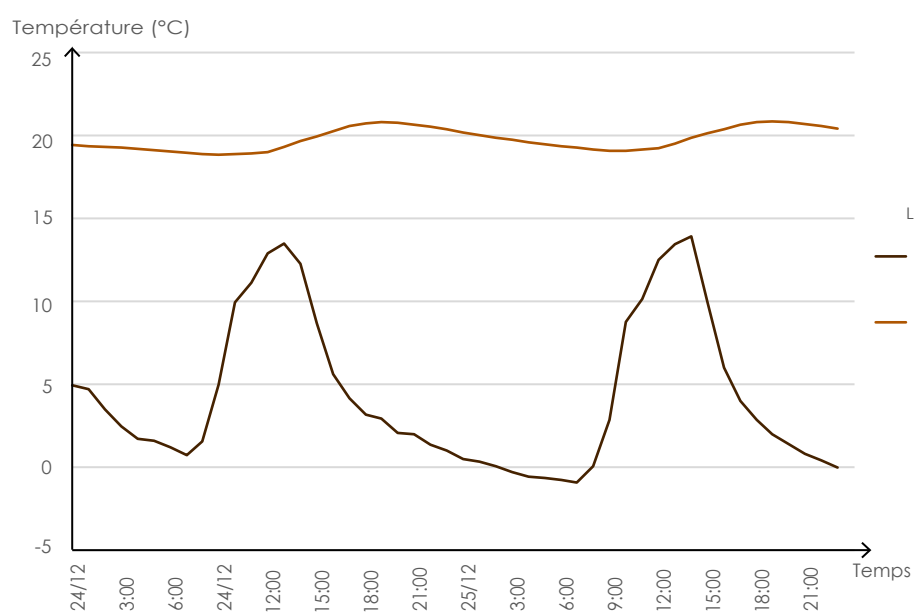


Figure 51 : Graphique représentant le déphasage en Décembre 2023, produit par l'auteur

Concernant l'humidité, on note en moyenne une augmentation d'environ 7 % entre 2019 et 2023. On passe d'un confort hygrométrique présent seulement 34 % du temps en 2019 à un confort total en 2023.

De façon plus générale, ces graphiques mettent en évidence le lien entre l'humidité extérieure et intérieure : l'hygrométrie intérieure évolue directement en fonction de celle de l'extérieur.

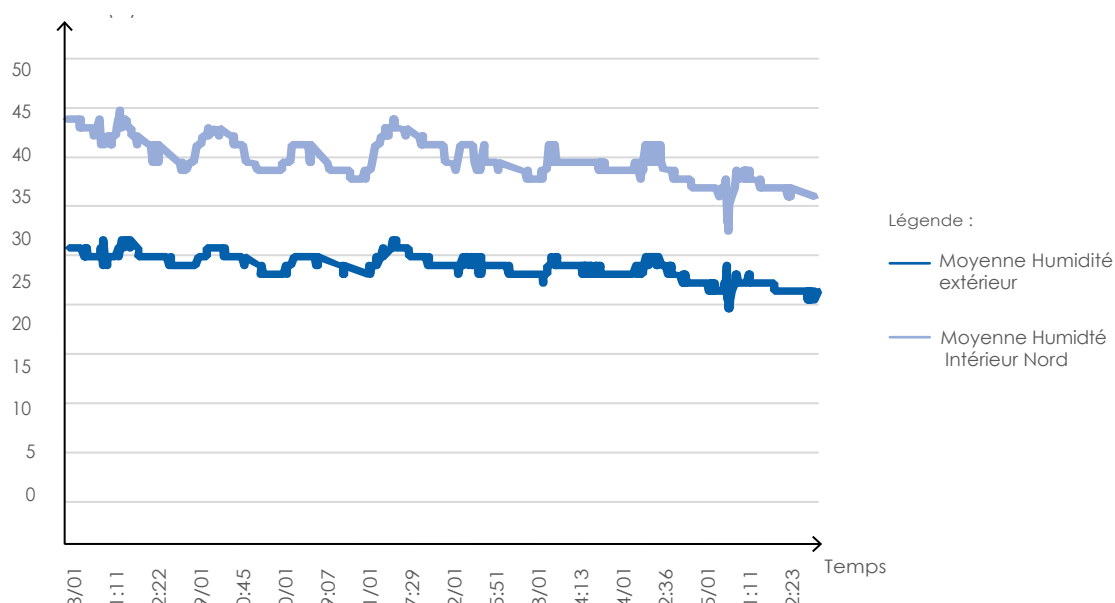


Figure 52 : Graphique représentant l'humidité en Janvier 2019, produit par l'auteur

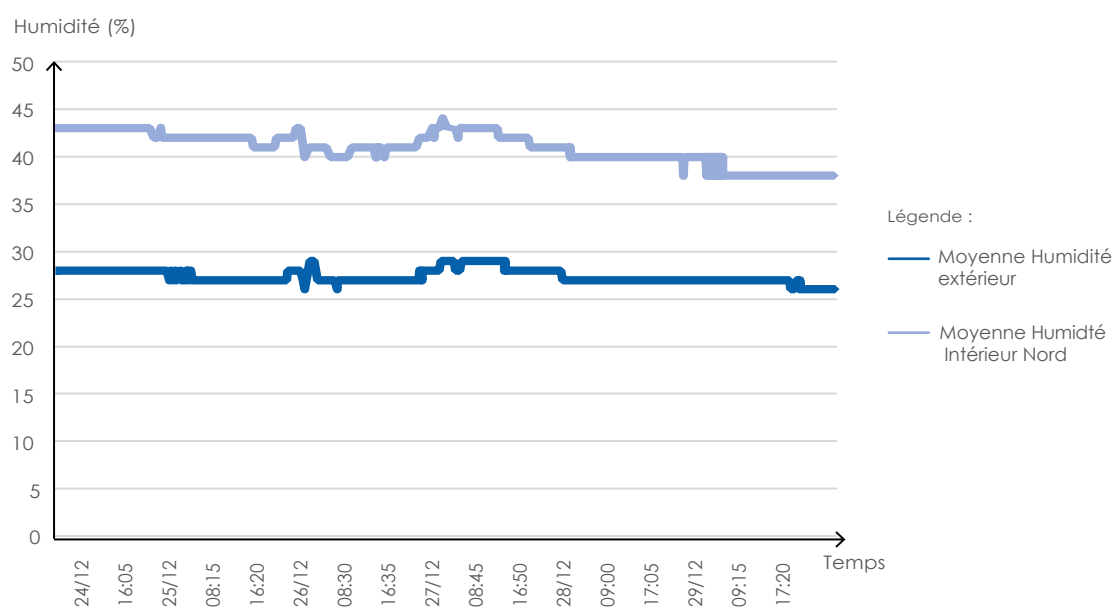


Figure 53 : Graphique représentant l'humidité en Décembre 2023, produit par l'auteur

L'aspect le plus significatif de cette analyse réside dans la consommation énergétique de la Maison 24h, qui illustre de manière concrète l'impact direct des choix constructifs sur la performance du bâtiment.

La comparaison des deux graphiques met clairement en évidence l'importance de la rénovation de la toiture. En effet, malgré des conditions intérieures similaires, notamment une température intérieure stable, la consommation énergétique a presque été divisée par deux après les travaux.

Ce résultat souligne à quel point la toiture joue un rôle déterminant dans le bilan thermique global du bâtiment. Elle constitue l'une des principales surfaces d'échange avec l'extérieur et donc une zone de perte de chaleur importante en hiver. L'amélioration de son isolation ou de sa conception permet de réduire les besoins en chauffage, sans altérer le confort intérieur.

Ainsi, cette évolution met en lumière l'efficacité de la rénovation menée sur la Maison 24h, démontrant qu'une intervention ciblée sur l'enveloppe peut avoir un impact significatif sur la performance énergétique, tout en maintenant un niveau de confort thermique constant.

On peut donc en conclure que l'isolation en brique de terre paille est une solution efficace qui, ici, a fait ses preuves. Le défi a été relevé : la consommation de la maison a drastiquement diminué, tout en maintenant un confort équivalent en hiver.

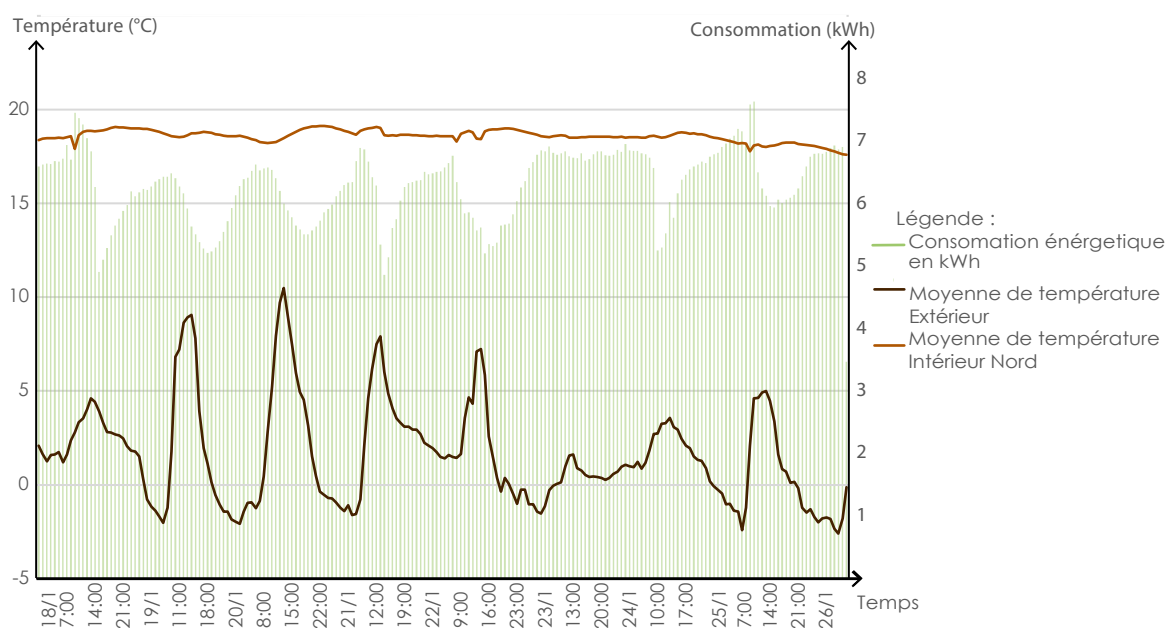


Figure 54 : Graphique représentant la consommation énergétique en Janvier 2019, produit par l'auteur

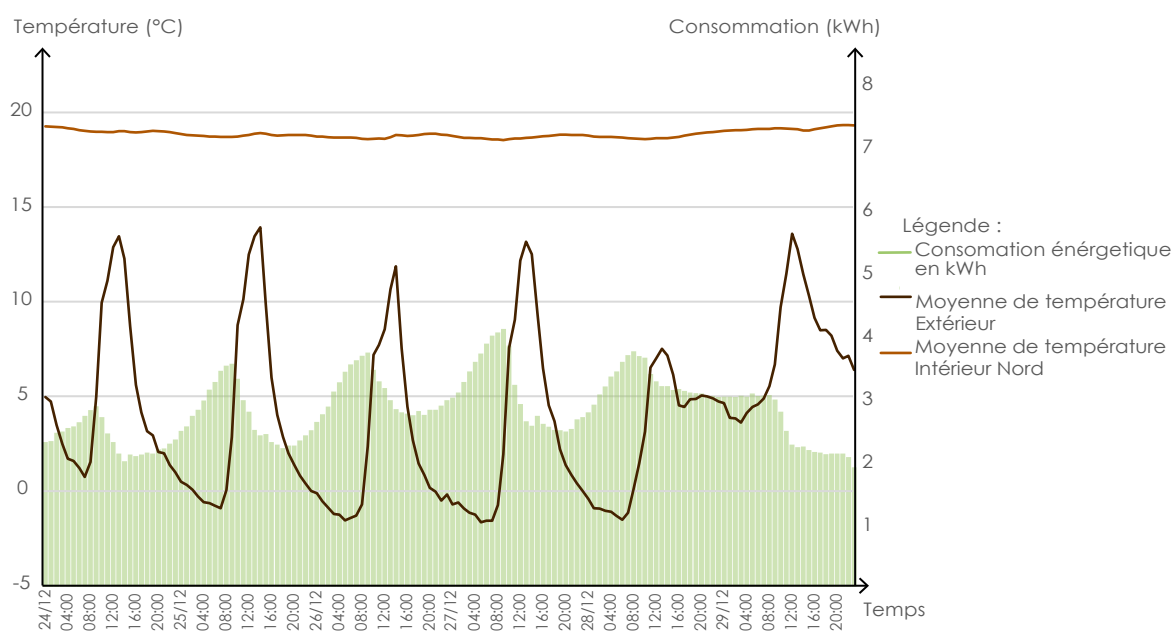


Figure 55 : Graphique représentant la consommation énergétique en Décembre 2023, produit par l'auteur

II.2.3.2 été-été

Dans un second temps, on peut s'intéresser aux deux périodes estivales soit à la deuxième phase, en juillet 2022, et à la dernière, entre juillet et août 2024.

Les températures moyennes sont globalement similaires : environ 29,78°C en 2022 et 29,51°C en 2024.

Si on regarde les températures intérieures, on remarque qu'elles ont diminué d'environ un degré en moyenne, aussi bien au Nord qu'au Sud, et cela se confirme également avec la médiane ainsi que pour les valeurs extrêmes (minimum et maximum). Les températures restent toutefois assez élevées, ce qui montre que le bâtiment reste soumis à des conditions estivales intenses.

Les graphiques mettent bien en évidence les fortes variations de température extérieure, mais malgré ces pics de chaleur, la température intérieure reste stable, ce qui est un bon indicateur du confort thermique et de la performance de l'enveloppe en terre.

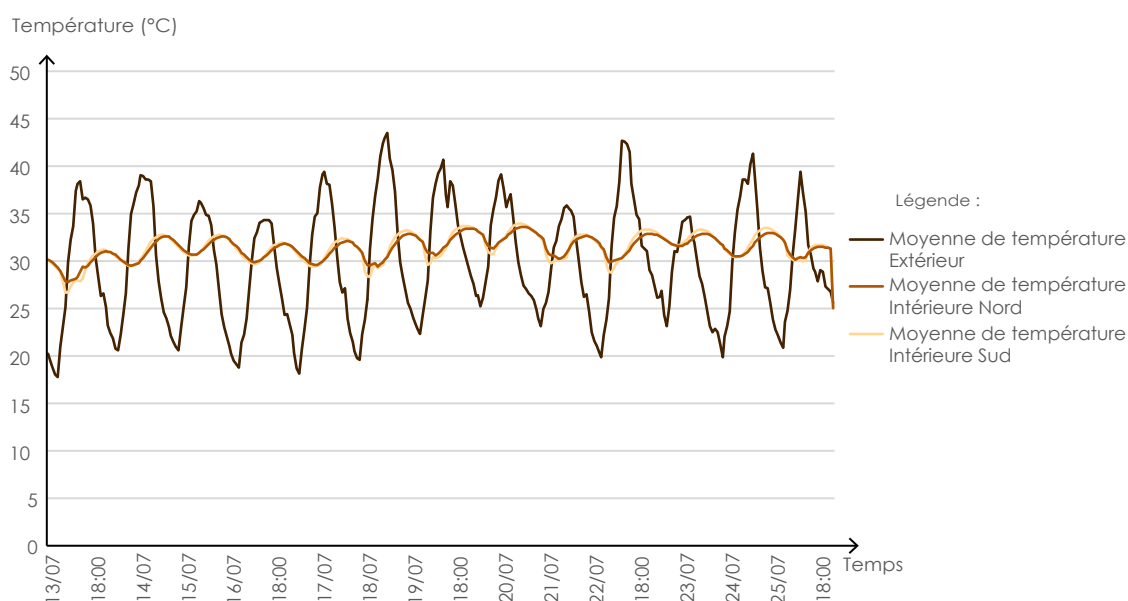


Figure 56 : Graphique représentant les températures en Juillet 2022, produit par l'auteur

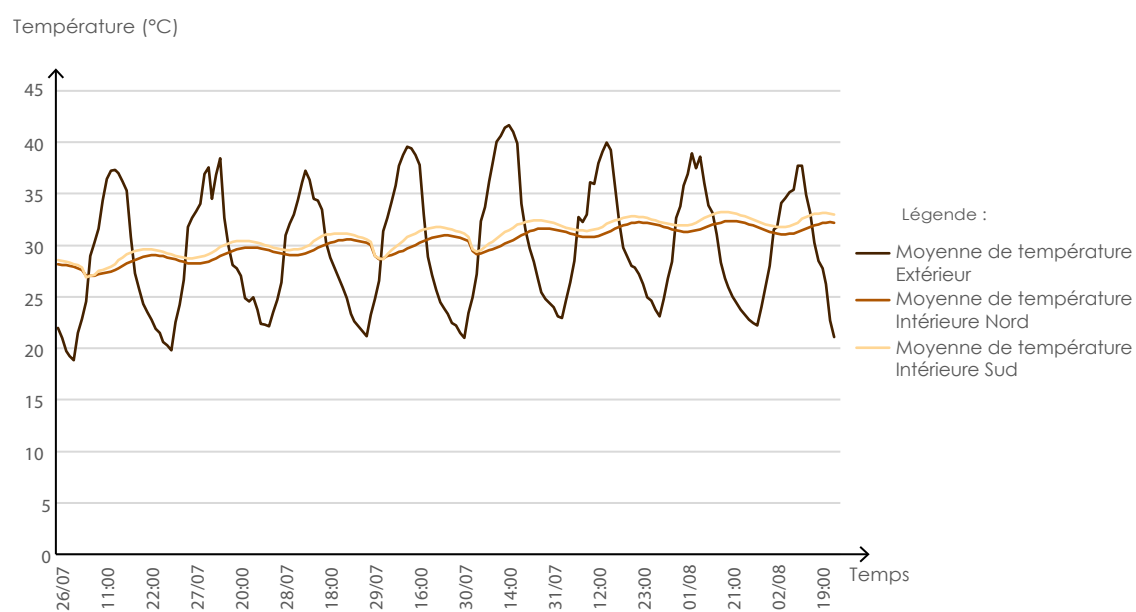


Figure 57 : Graphique représentant les températures en Juillet - Août 2024, produit par l'auteur

Si l'on s'intéresse au déphasage thermique, on constate qu'en 2022, le pic de chaleur extérieur survenait vers 15h, tandis qu'à l'intérieur il était atteint vers 22h. En 2024, les heures restent quasiment identiques, nous avons donc un déphasage thermique avoisinant les 7 heures .

Pour le moment le plus frais, en 2022, il avait lieu à 4h à l'extérieur et vers 8h à l'intérieur. En 2024, il se produit encore à 4h dehors, mais atteint l'intérieur un peu plus tard, vers 10h.

Ce décalage thermique montre bien que la terre crue joue un rôle d'inertie efficace, maintenant un intérieur plus frais lorsque les températures extérieures augmentent, et conservant la chaleur quand il fait plus frais dehors.

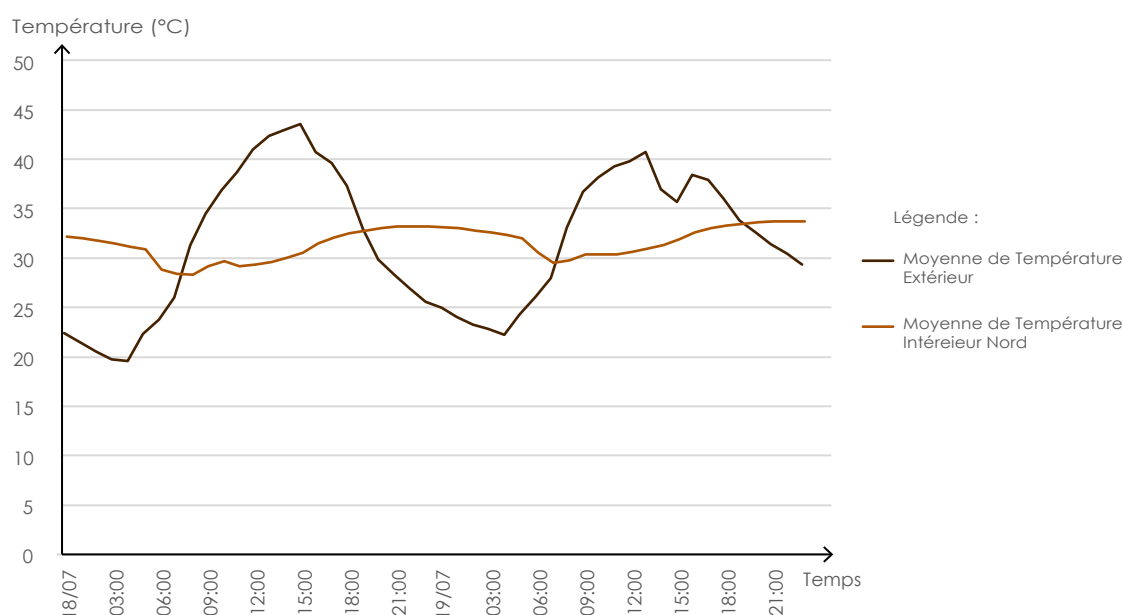


Figure 58 : Graphique représentant le déphasage en Juillet 2022, produit par l'auteur

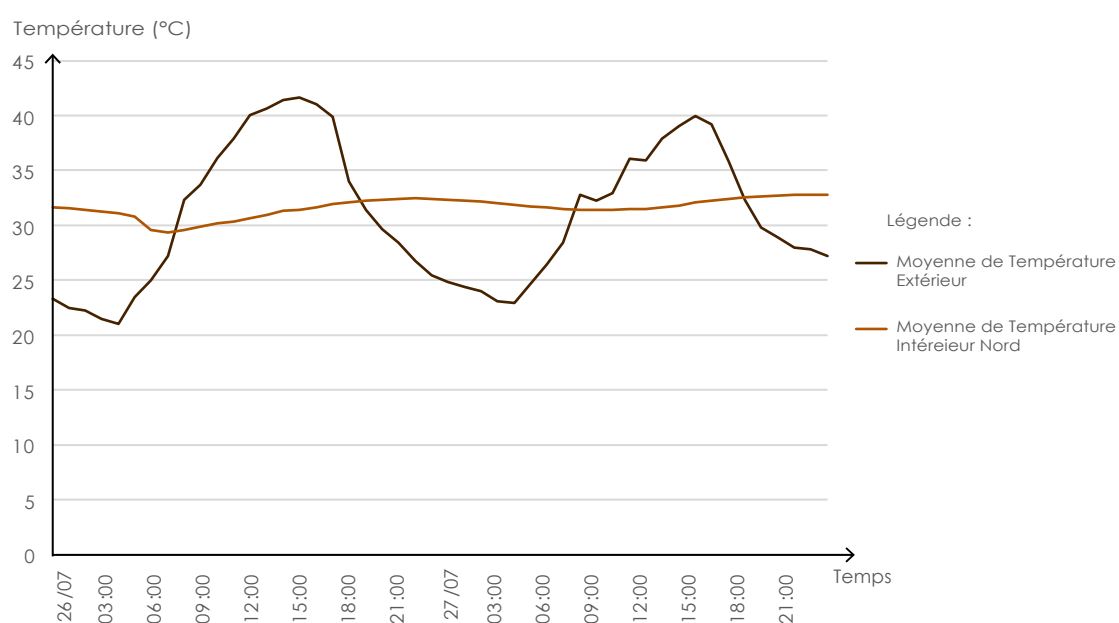


Figure 59 : Graphique représentant le déphasage en Juillet - Août 2024, produit par l'auteur

Concernant l'humidité, comme dans les autres périodes, l'humidité intérieure reste supérieure à celle de l'extérieur. On observe cependant une augmentation moyenne de 10 % de l'humidité extérieure entre 2022 et 2024, ce qui entraîne logiquement une hausse à l'intérieur.

Cela impacte directement le confort des usagers : en 2022, le confort hygrométrique (entre 40 % et 60 %) était respecté 93 % du temps, alors qu'en 2024, il ne l'est plus que 40 % du temps. On remarque aussi sur les graphiques que l'écart entre l'humidité extérieure et intérieure s'est légèrement creusé.

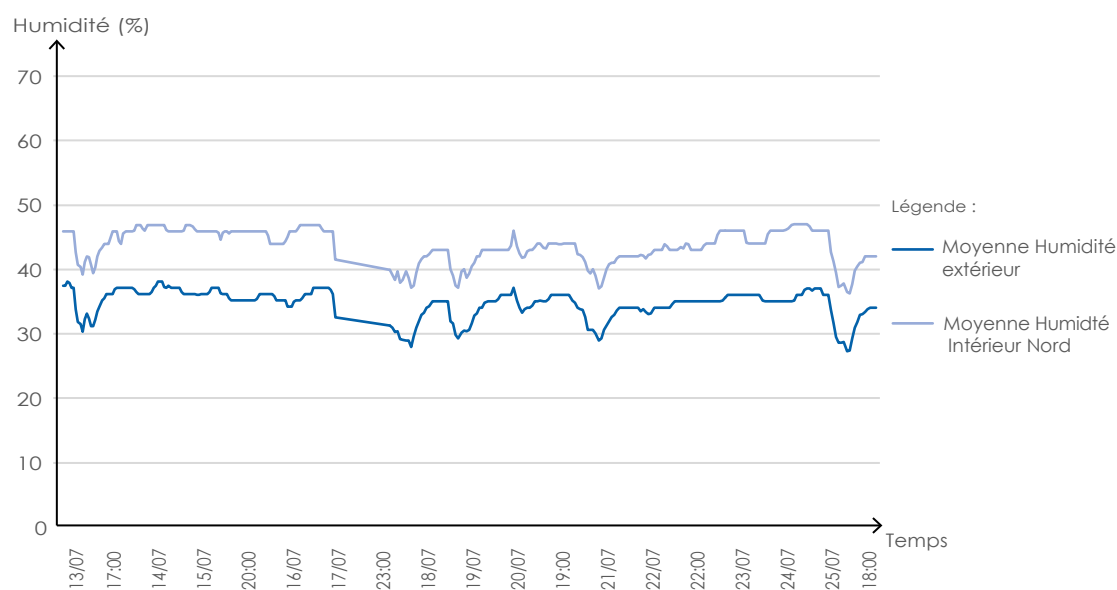


Figure 60 : Graphique représentant l'humidité en Juillet 2022, produit par l'auteur

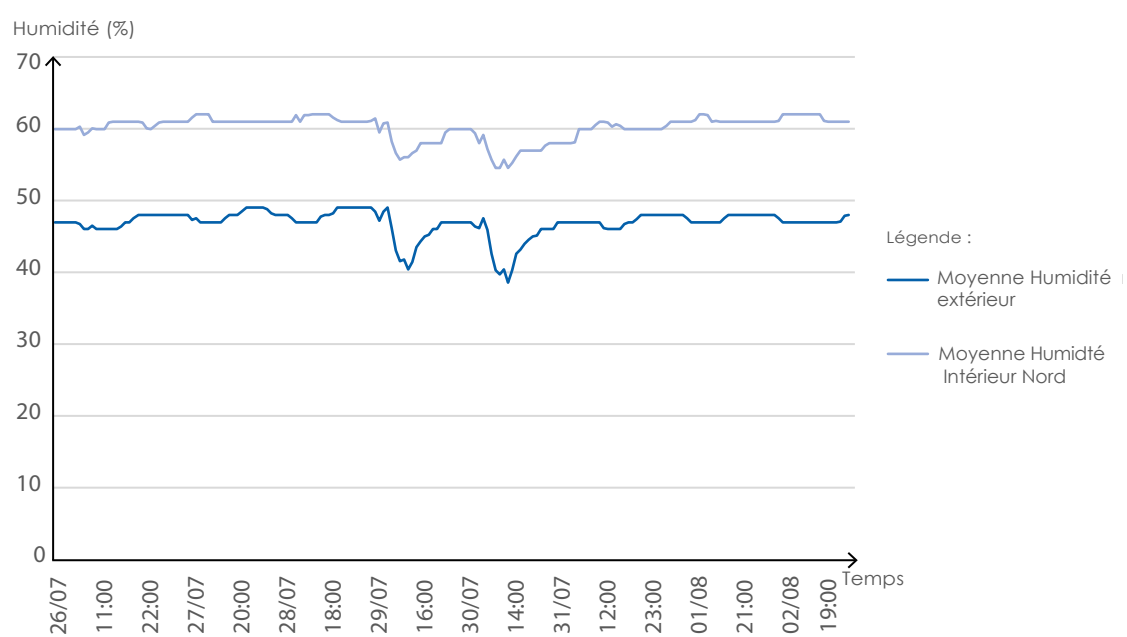


Figure 61 : Graphique représentant l'humidité en Juillet - Août 2024, produit par l'auteur

Du côté de la consommation énergétique, elle reste très faible sur ces deux amplitudes, tant pour le chauffage que pour la ventilation. La consommation liée à la ventilation est quasiment nulle, probablement faute d'un système mécanique sur le site. Pour le chauffage, la consommation quotidienne moyenne passe de 0,05 kWh en 2022 à 0,028 kWh en 2024, soit une baisse notable mais sur des valeurs déjà très faibles.

Si l'on considère qu'un confort thermique intérieur se situe entre 23 °C et 27 °C, ce critère n'est respecté que 0,64 % du temps en 2022 et 0,88 % en 2024. Bien qu'une légère amélioration soit perceptible, elle demeure marginale et insuffisante pour être considérée comme significative. En d'autres termes, le confort thermique intérieur reste largement insatisfaisant, traduisant une performance thermique globalement insuffisante.

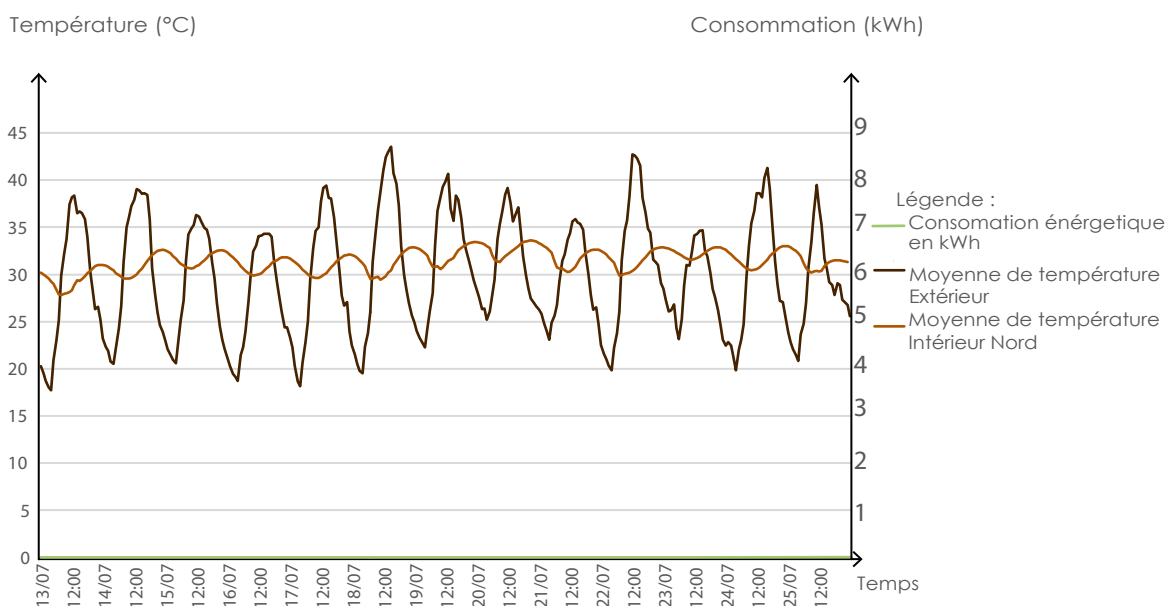


Figure 62 : Graphique représentant la consommation énergétique en Juillet 2022, produit par l'auteur

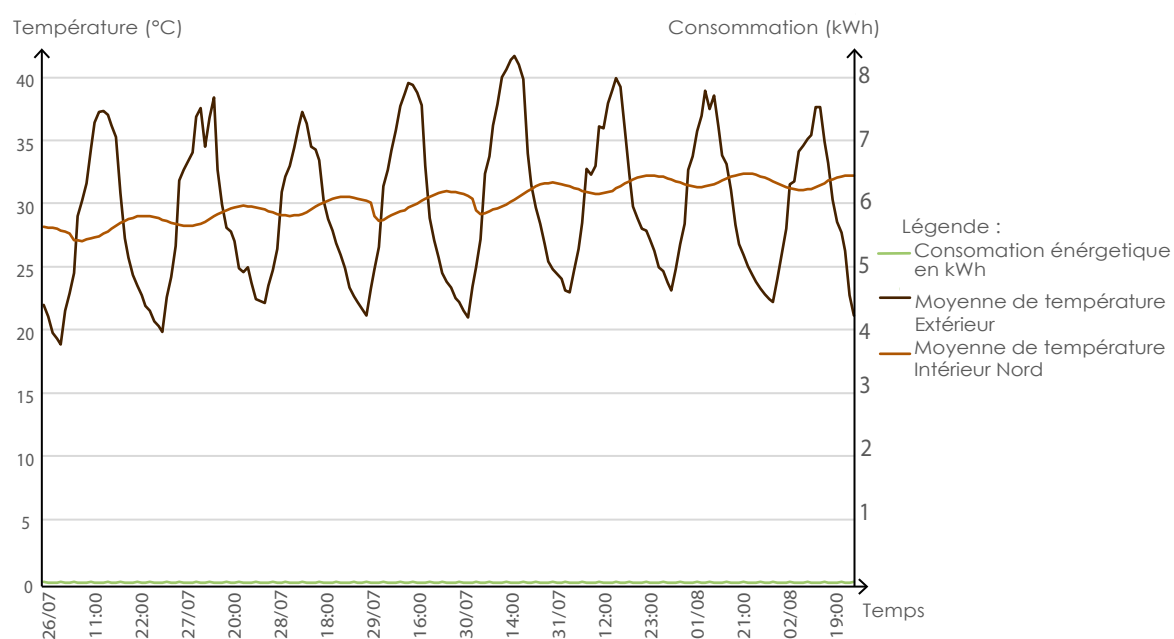


Figure 63 : Graphique représentant la consommation énergétique en Juillet - Août 2024, produit par l'auteur

II.2.3.2 été-été

Pour finir cette analyse comparative, il est intéressant d'opposer les périodes hivernales et estivales afin d'évaluer le comportement global du bâtiment face aux variations climatiques extrêmes.

Si l'on compare la première phase hivernale de janvier 2019 à la phase estivale de juillet 2022, on constate un écart important entre les températures extérieures : la moyenne passe de 2,2 °C en hiver à 29,78 °C en été, soit près de 28 °C d'écart. Pourtant, à l'intérieur, la température n'augmente pas dans les mêmes proportions : on passe de 18,7 °C à 31,39 °C, soit une hausse d'environ 12 °C. Cette différence met en évidence l'inertie thermique de la terre, capable d'amortir les variations de température extérieure. Autrement dit, même lorsque l'écart extérieur atteint près de 30 °C, la température intérieure reste plus stable, confirmant l'efficacité du matériau face aux variations climatiques.

On observe également que la différence entre les températures intérieures Nord et Sud reste faible, quelle que soit la saison, ce qui traduit une homogénéité du confort thermique à l'intérieur du bâtiment. En hiver, l'écart entre les deux orientations est d'environ 2 °C, tandis qu'en été il n'excède pas 0,5 °C. Cette stabilité témoigne du rôle régulateur de la terre crue, qui limite les déséquilibres thermiques liés à l'ensoleillement.

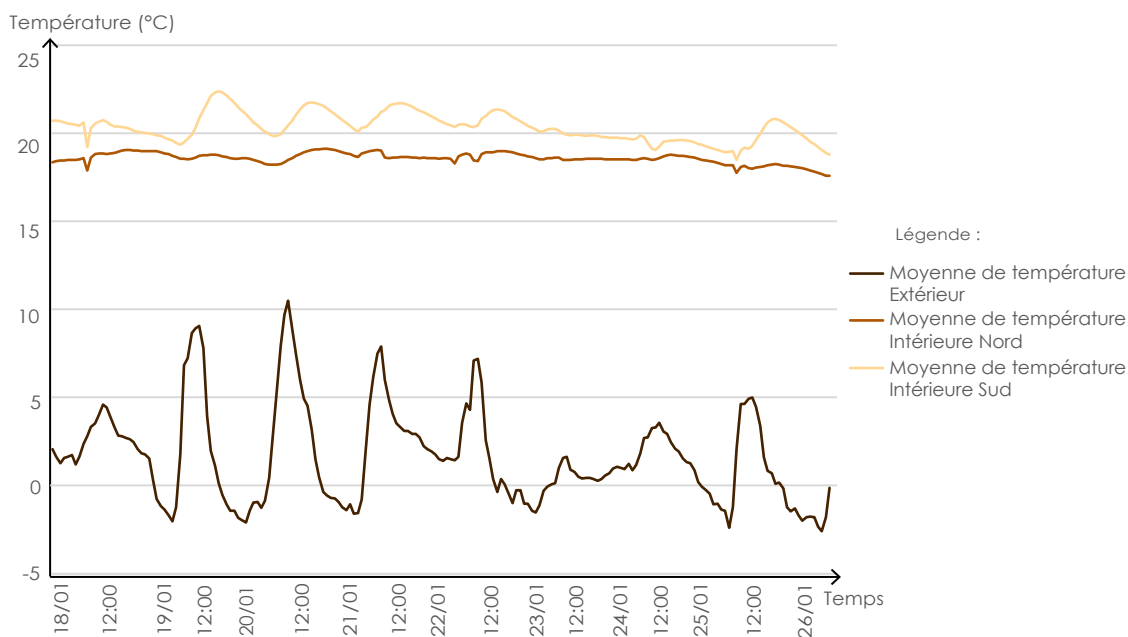


Figure 64 : Graphique représentant les températures en Janvier 2019, produit par l'auteur

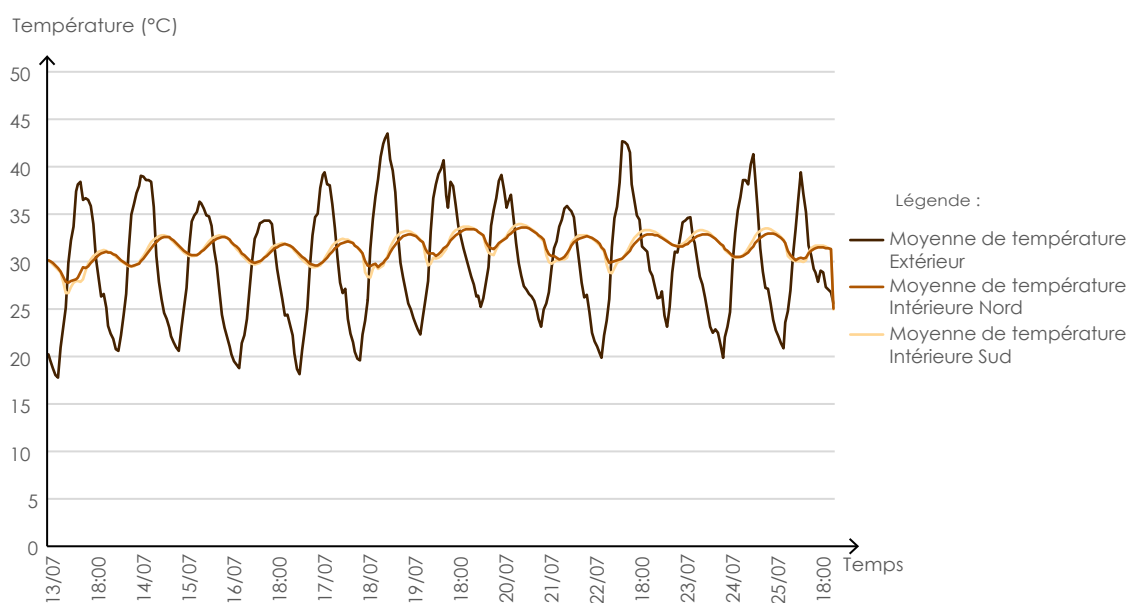


Figure 65 : Graphique représentant les températures en Juillet 2022, produit par l'auteur

Concernant l'humidité relative, on note un air beaucoup plus sec à l'extérieur en hiver, avec une moyenne de 26,85 %, contre 34,64 % en été. À l'intérieur, les valeurs varient de 39,9 % en hiver à 43,82 % en été, ce qui montre que la terre participe à une régulation efficace de l'humidité. En absorbant l'excédent d'humidité dans l'air chaud et en la restituant lorsque celui-ci devient trop sec, elle permet de maintenir une ambiance intérieure plus stable et plus confortable.

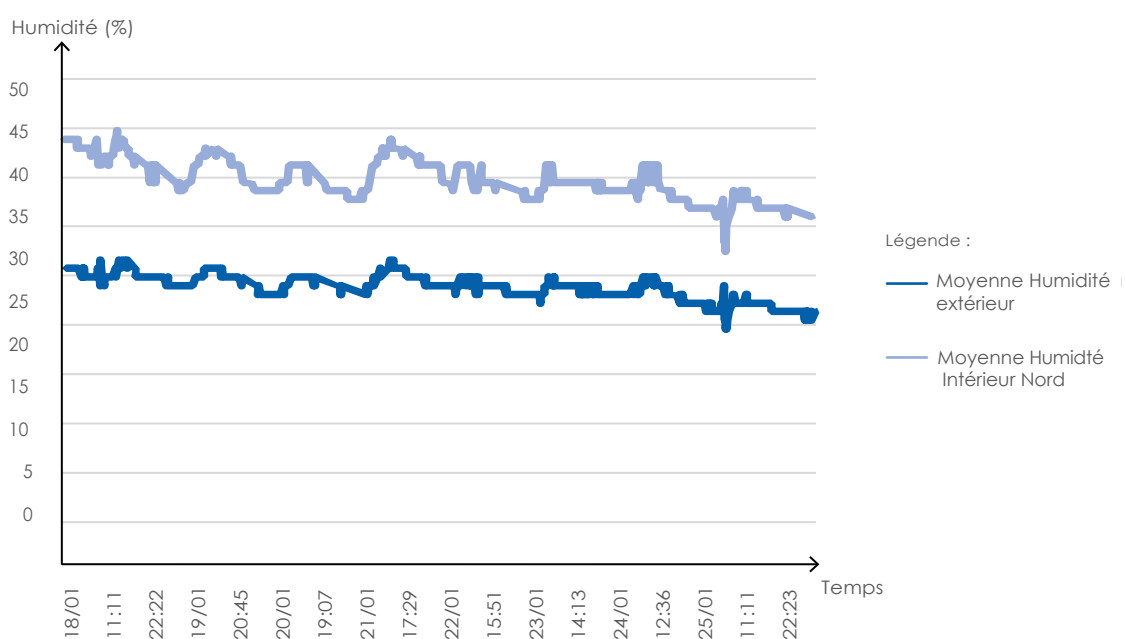


Figure 66 : Graphique représentant l'humidité en Janvier 2019, produit par l'auteur



Figure 67 : Graphique représentant l'humidité en Juillet 2022, produit par l'auteur

Sur le plan énergétique, les contrastes sont marqués entre les deux saisons. En hiver 2019, la consommation quotidienne moyenne s'élève à 150,86 kWh, principalement liée au chauffage, alors qu'en été 2022, elle chute à seulement 0,05 kWh. Cette différence s'explique bien sûr par l'absence de besoin de chauffage en été.

Enfin, en termes de confort, si l'on considère que la température idéale se situe entre 23 °C et 27 °C, en été et entre 19 °C et 23 °C en hiver, cet objectif est atteint en hiver 53% du temps au Sud, mais il reste rarement observée en été. Le confort ressenti provient donc davantage de la stabilité thermique et hygrométrique que de la conformité stricte à des valeurs idéales.

En conclusion, la comparaison entre les périodes hivernales et estivales met clairement en évidence la performance de la terre crue comme matériau régulateur. Le bâtiment parvient à limiter les variations intérieures malgré des conditions extérieures extrêmes, tout en assurant une ambiance stable et économe en énergie. Cela confirme que l'inertie et la porosité de la terre jouent un rôle essentiel dans la recherche d'un confort thermique passif et durable.

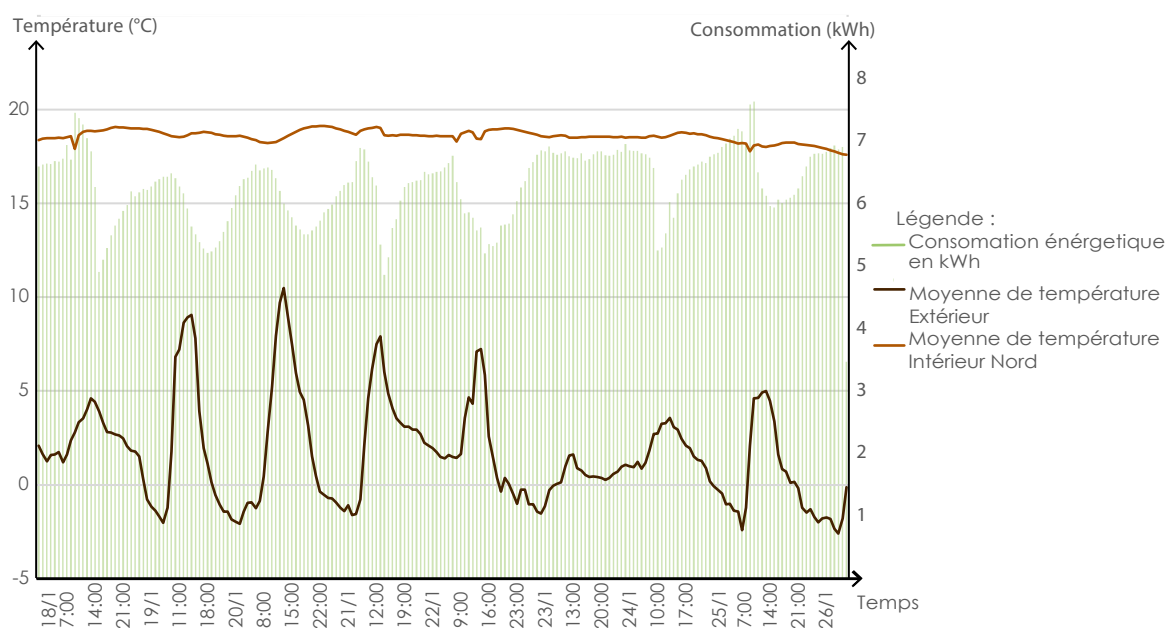


Figure 68 : Graphique représentant la consommation énergétique en Janvier 2019, produit par l'auteur

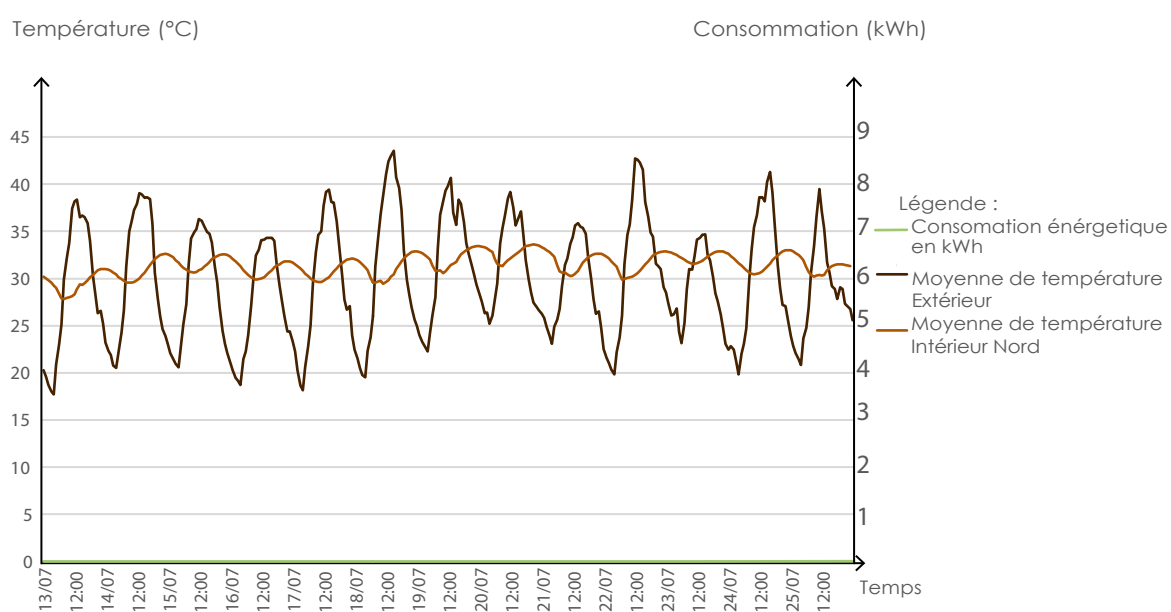


Figure 69 : Graphique représentant la consommation énergétique en Juillet 2022, produit par l'auteur

II.2.4 Comparaison avec un matériau plus conventionnel

Pour mettre en perspective les résultats obtenus lors des différentes phases d'analyse, il est intéressant de comparer le comportement thermique de la terre crue à celui d'un matériau plus courant dans la construction contemporaine : le béton. Ce dernier est aujourd'hui largement utilisé pour ses qualités mécaniques, sa durabilité et sa facilité de mise en œuvre, mais il présente des limites importantes en termes de développement durable. Dans le contexte actuel de l'architecture, le béton est en effet très énergivore et son impact environnemental est conséquent. C'est pourquoi on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation de matériaux biosourcés ou géosourcés, comme la terre crue, qui offrent des performances intéressantes tout en étant plus respectueux de l'environnement.

Propriétés thermiques du béton

Le béton est un matériau dense, à forte conductivité thermique. En moyenne, sa conductivité se situe entre 1,4 et 2,4 W/m²K, selon la composition et la densité (CSTB, 2019). Cette valeur est nettement supérieure à celle de la terre crue, qui varie généralement entre 0,6 et 1,3 W/m²K.

Cette différence signifie que le béton transmet plus rapidement la chaleur, ce qui le rend moins performant pour limiter les variations de température intérieure. En période estivale, cela se traduit souvent par une surchauffe rapide des espaces, tandis qu'en hiver, la chaleur produite à l'intérieur s'échappe plus vite vers l'extérieur.

Sa capacité thermique volumique, c'est-à-dire la quantité de chaleur qu'il peut stocker, est d'environ 2,2 à 2,6 MJ/m³·K pour le béton, contre 1,6 à 2,2 MJ/m³·K pour la terre crue⁵³. Le béton est donc capable de stocker légèrement plus de chaleur, mais il la restitue plus vite en raison de sa diffusivité thermique plus élevée. À l'inverse, la terre crue, bien que stockant un peu moins d'énergie, la restitue plus lentement, ce qui améliore le confort intérieur en stabilisant la température sur une période plus longue.

⁵³ F. El Fgaier, S. Dubois, M. Gomina et H. Cagnon, « Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review », Sustainability, vol. 11, n° 19, 2019, p. 5342, [en ligne] : <https://doi.org/10.3390/su11195342>.

Comportement face aux variations climatiques

Les relevés réalisés dans le cadre de cette étude montrent que la température intérieure dans les bâtiments en terre crue reste relativement constante, malgré des variations extérieures importantes. En comparant avec les propriétés du béton, on comprend mieux ce phénomène : le béton, par sa forte conductivité, réagit plus rapidement aux changements de température extérieure, créant ainsi des pics thermiques moins confortables à l'intérieur⁵⁴.

Dans une région comme Grenoble, où les amplitudes thermiques saisonnières sont fortes (hivers froids et étés très chauds), cette inertie plus faible du béton constitue un désavantage majeur. À l'inverse, la terre crue agit comme un tampon thermique, retardant le passage de la chaleur de plusieurs heures. Ce déphasage thermique, observé dans les mesures réalisées, permet de conserver la fraîcheur intérieure en journée et la chaleur accumulée la nuit, sans recours excessif au chauffage ou à la climatisation.

Régulation hygrométrique et confort intérieur

Au-delà de la température, la terre crue possède une capacité naturelle à réguler l'humidité de l'air, grâce à sa porosité et à sa capacité d'absorption et de restitution de la vapeur d'eau. Le béton, au contraire, est un matériau quasi étanche à la vapeur d'eau, ce qui limite les échanges hygrométriques.

Dans les relevés effectués, l'humidité intérieure des bâtiments en terre crue reste souvent comprise entre 40% et 60%, c'est-à-dire dans la zone de confort hygrométrique optimale. Dans un bâtiment en béton, ces variations sont généralement plus marquées, avec des risques d'air trop sec en hiver et trop humide en été, nécessitant une régulation mécanique supplémentaire (ventilation, climatisation).

⁵⁴ CSTB – Inertie thermique et confort d'été, Guide technique, 2016.

⁵⁵ Serri et al., Journal of Building Engineering, 2020 ;

Walker et al., Earth Building Materials, 2019

Conséquences sur la consommation énergétique

Cette différence de comportement se répercute directement sur la consommation énergétique. Dans le cas étudié, les besoins en chauffage et en climatisation d'un bâtiment en terre crue restent faibles grâce à l'inertie et à la régulation naturelle du matériau. À l'inverse, un bâtiment en béton nécessite souvent un apport énergétique plus important pour maintenir des conditions de confort équivalentes. Selon plusieurs études comparatives, la terre crue peut réduire la consommation énergétique annuelle de 20 à 40 % par rapport au béton, selon le climat et l'isolation complémentaire utilisée⁵⁵.

En résumé, la comparaison entre la terre crue et le béton met en évidence des différences fondamentales. Le béton est performant sur le plan structurel, mais peu adapté pour assurer un confort thermique passif. La terre crue, malgré une résistance mécanique plus faible, offre une inertie et une régulation hygrométrique supérieures, favorisant un confort intérieur plus constant.

Dans le contexte climatique de Grenoble, la terre crue s'avère donc plus adaptée aux enjeux de confort d'été et d'efficacité énergétique, tout en limitant le recours aux systèmes actifs.

⁵⁵ Serri et al., Journal of Building Engineering, 2020 ;
Walker et al., Earth Building Materials, 2019
Figure 70 : Mur en pisé



II.3 Enjeux liés aux perceptions et aux données terrain

II.3.1 Comment les ressentis personnels et les mesures scientifiques se complètent pour évaluer le confort thermique

L'analyse de la Maison 24h combine à la fois des données objectives et des retours plus subjectifs des usagers. Cette approche m'a permis de donner du sens aux chiffres et de dépasser les simples tableaux pour comprendre ce qu'ils traduisent concrètement dans la vie quotidienne.

Les données scientifiques mettent en avant l'inertie thermique de la terre crue, malgré les variations de température extérieure, la température intérieure reste relativement stable avec des écarts négligeables entre les orientations Nord et Sud. L'humidité est aussi régulée par la terre crue et permet de maintenir une ambiance intérieure proche de la zone de confort. Cette analyse m'a permis de mettre en avant le rôle tampon de la terre crue qui limite les variations climatiques.

Les entretiens effectués auprès des usagers de la maison complète cette analyse avec une dimension plus sensible. Il m'a été confié lors de ces trois entretiens une sensation de bien être, de cocon, malgré les épisodes de chaleur intense et de froid hivernal. Le confort est tout de même impacté par ces températures parfois extrêmes, s'ajoute à cela l'acoustique ainsi que la lumière naturelle et l'esthétique des voûtes. Mais on peut retenir tout de même l'aspect positif que peut avoir la terre sur le bien être psychologique et sensoriel des occupants, aspect que les chiffres seuls ne peuvent pas capturer. De ce fait les données quantitatives et les témoignages qualitatifs se complètent : les mesures scientifiques donnent des indications précises sur la performance du bâtiment, tandis que les ressentis des usagers permettent de comprendre la dimension sensorielle liée au confort. Cette complémentarité est indispensable pour comprendre dans sa globalité la qualité d'un bâtiment en terre crue.

II.3.2 Premières réflexions sur les pistes d'amélioration

Malgré les qualités de la terre crue évoquées précédemment, l'analyse met en avant plusieurs points à améliorer pour un meilleur confort thermique.

Dans un premier temps la chaleur estivale est un problème majeur. Les relevés de juillet 2022 et août 2024 montrent des pics de température extérieure entraînant des températures intérieures avoisinant les 33°C, dépassant largement le seuil de confort. Les mesures et les témoignages suggèrent l'amélioration de la ventilation naturelle, et l'ajout de brises soleil permettrait de réguler la température intérieure. La solution d'ombrage par la végétation pourrait aussi être envisagée.

En hiver, on a pu lire une diminution importante de la consommation de chauffage après l'isolation de la toiture. Mais certaines zones proches des ouvertures restent tout de même sensibles au froid.

L'amélioration de l'étanchéité à l'air et le changement des menuiseries pourraient réduire ces pertes et diminuer d'avantage les besoins de chauffage.

Les usagers se plaignent également de l'acoustique, qui serait aussi un axe d'amélioration à envisager. La résonance dans les voûtes peut être désagréable au quotidien. L'ajout de panneaux absorbants pourrait atténuer la résonance, sans pour autant nuire à l'architecture.

Cette analyse confirme que les données scientifiques et les expériences des utilisateurs sont des outils d'analyse considérables pour ajuster les solutions en fonction des ressentis de chacun. Cette réflexion met en avant la capacité du matériau face au confort thermique. Il est tout de même important de se rendre compte qu'une certaine connaissance est nécessaire pour fabriquer des espaces agréables dans n'importe quelle situation.

L'étude de la Maison 24h a permis de mettre en avant les qualités et les limites de la terre crue face aux variations climatiques. À travers l'analyse croisée des données quantitatives et des retours d'usagers, il apparaît clairement que ce matériau joue un rôle de régulateur thermique et hygrométrique efficace. Les mesures montrent une certaine stabilité des températures intérieures et une modulation naturelle de l'humidité, tandis que les témoignages soulignent en partie le confort sensoriel et psychologique que procure un espace en terre, ressenti comme chaleureux et apaisant.

Cependant, cette analyse révèle aussi certaines limites. La chaleur estivale reste difficile à maîtriser, et certaines zones proches des ouvertures connaissent encore des inconforts en hiver. L'acoustique des voûtes et l'exposition au rayonnement solaire nécessitent des ajustements pour améliorer l'expérience des usagers. Ces observations confirment que, malgré ses performances, la terre crue nécessite une conception réfléchie et adaptée pour exploiter pleinement son potentiel, notamment en matière de confort thermique passif.

Ce double regard – technique et sensible – pose les bases de la réflexion suivante : au-delà de la performance observée sur le terrain, comment concevoir des bâtiments en terre crue qui soient à la fois adaptés aux climats et optimisés pour le confort des occupants ? C'est cette question qui sera au cœur du chapitre 3, où seront explorées les solutions techniques et stratégiques pour maximiser les atouts de la terre crue dans la conception contemporaine.





Figure 72 : Enduit à l'argile avec incrustation de paille

INTRODUCTION	
I- ÉTAT DE L'ART	
II- TEST & ANALYSE D'UN BÂTIMENT EN TERRE CRUE	
III- VERS UNE ARCHITECTURE EN TERRE CRUE ADAPTÉE ET DURABLE	
IV- CONCLUSION	
V- BIBLIOGRAPHIE	
VI- ANNEXES	

Avant d'aborder cette dernière partie, il est essentiel de comprendre ce qu'est un bâtiment passif. Selon le Passivhaus Institut de Darmstadt, un bâtiment est considéré comme passif lorsqu'il maintient une température ambiante agréable sans recourir au chauffage conventionnel en hiver ni à la climatisation en été. Les besoins en chauffage doivent être inférieurs à 15 kWh/ m²/ an, et la consommation énergétique globale inférieure à 120 kWh/m²/an⁵⁶.

La notion de « température agréable » est subjective et varie selon les individus. Les facteurs à prendre en considération sont la température, l'humidité, la vitesse de l'air ainsi que l'accumulation de chaleur par le matériau. Différents digrammes nous montrent ici ce qu'on pourrait considérer comme confort.

Pour les besoins de cette étude, nous considérons que le confort thermique se situe entre 17°C et 21°C en hiver, et entre 24°C et 28°C en été⁵⁷.

Le principe d'un bâtiment passif repose sur la réduction maximale des besoins en chauffage et en climatisation, ce qui implique de réfléchir à plusieurs éléments dès la conception architecturale.

56 ROBE, Carsten. Construire une maison passive : Conception, physique de la construction, détails de construction, rentabilité. Éditions L'Inédite, Paris, 2008.

57 LAVOYE, Frédéric ; BOEUF, Frédéric ; THELLIER, Françoise. Qualité des ambiances dans les bâtiments : Le confort thermique de l'habitant. Presses des Mines, Paris, 2015,

III.1 Propositions concrètes pour les constructions en terre crue dans divers climats

III.1.1 Combinaisons de dispositifs passifs et adaptation des techniques de construction

L'implantation et l'orientation

L'implantation du bâtiment est cruciale, surtout pour un bâtiment en terre crue. Il faut tenir compte de la course du soleil et de la direction des vents dominants. Une exposition optimale au soleil permet d'augmenter le confort thermique tout en réduisant la consommation énergétique

Dans un premier temps l'orientation sud est à privilégier pour les ouvertures qui favorisent la lumière naturelle et facilitent le contrôle solaire en été grâce à des protections adaptées (toits débordants, volets, brise-soleil). Du côté nord les façades sont généralement utilisées pour les espaces tampons, tels que garages ou circulations. Ces zones permettent de protéger les espaces de vie du froid en hiver et de la chaleur en été, améliorant ainsi le confort général⁵⁸.

Il est également recommandé de concevoir des espaces traversants, afin de permettre une ventilation naturelle et favoriser l'évacuation de la chaleur en été.

La réflexion de l'orientation est cruciale pour tout type de bâtiment. Mais pour une bâtiment en terre crue cela va être encore plus impactant. La masse thermique du matériau va permettre de profiter des apports solaires pour les restituer à l'intérieur durant la nuit, lorsqu'il fait plus frais.

La protection solaire

La protection solaire doit être intégrée dès la conception. Les solutions extérieures sont les plus efficaces : un rideau ou store intérieur ne bloque la chaleur qu'après qu'elle soit entrée dans la pièce. La protection solaire doit permettre de bloquer le soleil en été tout en laissant passer la chaleur en hiver. Les volets roulants sont une solution efficace, notamment sur la façade ouest, où la surface vitrée est souvent importante. Ils permettent de réguler la quantité de soleil entrant selon la saison, optimisant ainsi le confort thermique et réduisant les besoins en énergie.

Les brise-soleil peuvent prendre d'autres formes comme des avancées de toiture, des cloîtrats, des auvents ou encore même de la simple végétation. Ils ont tous le même objectif : protéger le bâtiment des rayons du soleil estival tout en gardant une lumière naturelle diffuse pour le confort des usagers⁵⁹.

⁵⁸ VU, Brigitte. Le guide de l'habitat passif. Éditions Eyrolles, 2008

⁵⁹ Ibid

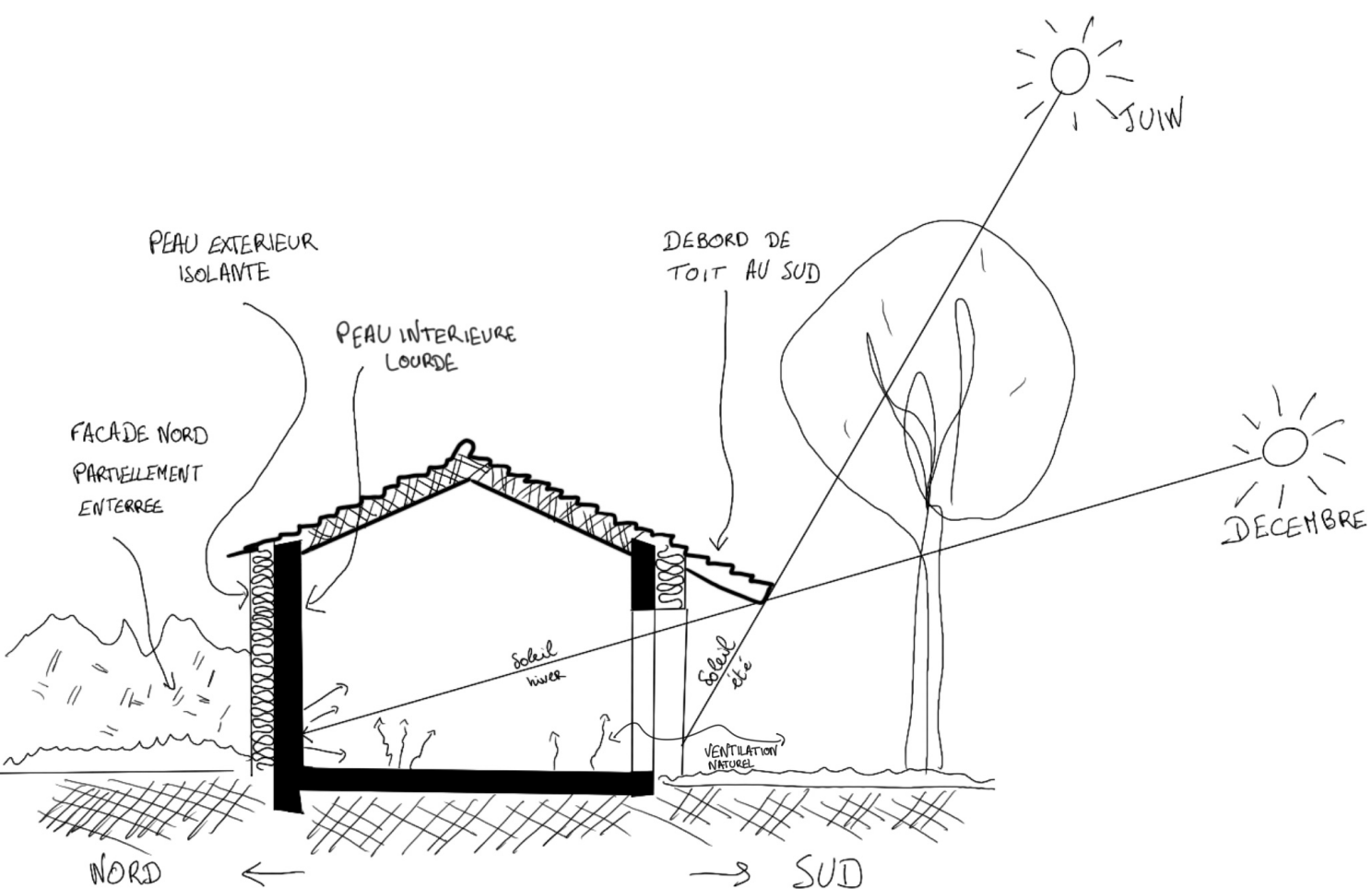


Figure 73 : Schéma des dispositifs passifs

Isolation

Dans un bâtiment passif, l'isolation est un élément primordial pour diminuer les déperditions. Il est important de réfléchir cette étape pour avoir le moins de ponts thermiques possible dans l'enveloppe. C'est pourquoi l'isolation de la dalle, en contact avec le sol, et de la toiture est très importante. La toiture représente un élément crucial dans l'isolation. En effet en hiver elle est exposée aux déperditions et en été à de forts rayonnements solaires. Il est important de s'en protéger pour minimiser les besoins de chauffage et de climatisation.

Contrairement à ce qu'on peut penser, la terre n'est pas un bon isolant. Donc la couche d'isolant est tout aussi nécessaire dans un bâtiment en terre crue, cet isolant peut directement être mélangé à la terre. C'est ce qui a été fait pour la rénovation de la toiture de la maison 24h avec des briques de terre et de paille. En effet, les isolants peuvent eux aussi être des matériaux biosourcés comme du chanvre, de la paille, du liège ou encore de la fibre de bois.

Ventilation

La ventilation est un élément clé du confort thermique, le renouvellement d'air est crucial pour garantir une ambiance intérieure agréable. Le principe est de faire circuler l'air pour réguler la température intérieure. Pour cela différentes options se présentent à nous, la plus simple est l'orientation : concevoir des espaces traversants, permet une ventilation naturelle qui favorise l'évacuation de la chaleur en été. On peut aussi avoir des dispositifs plus complexes, tels que des tours ou encore des cheminées solaires. Et enfin on peut aussi créer des patios pour amener un peu d'air au centre des espaces.

La performance d'un bâtiment en terre crue ne dépend pas seulement du matériau. C'est l'association entre les dispositifs passifs et le matériau, qui rendront les bâtiments en terre agréable à vivre. Pour aller encore plus loin et faire fonctionner l'architecture avec son environnement, on peut aussi introduire la notion de bioclimatique qui va venir compléter les dispositifs passifs. Pour rendre les constructions en terre plus ordinaires, il faut constamment explorer les savoir-faire traditionnels et aller encore plus loin pour trouver de nouvelles solutions innovantes⁶⁰.

59 Ibid

III.1.2 Mise en place de solutions innovantes ou traditionnelles

Après avoir observé comment les dispositifs passifs influencent la performance des bâtiments, il est nécessaire de comprendre le rôle du matériau en lui-même. Nous cherchons ici à approfondir la réflexion sur les techniques constructives innovantes de la terre crue en elle-même. Ce matériau ancestral fait son retour dans notre société, à cheval entre la tradition et l'innovation. Ici nous considérerons ces deux caractéristiques en intégrant les recherches expérimentales contemporaines sans pour autant mettre de côté le savoir-faire vernaculaire qui est à revaloriser. On cherche ici à mettre en avant ces deux dimensions sans pour autant les opposer, elles peuvent s'enrichir mutuellement pour créer une architecture performante et ancrée dans le temps.

III.1.2.1 Solutions Innovantes

Matériaux hybrides et renforcés

Nous avons pu constater dans les briques allégées faites pour la rénovation de la toiture de la maison 24h, que l'ajout de paille à la terre crue rendait le matériau encore plus performant. Cela peut-être une piste d'innovation, coupler la terre avec des fibres naturelles peut améliorer la cohésion du matériau et donc limiter les fissures lors du séchage, cela peut aussi le rendre plus durable et même renforcer sa résistance à la traction.

La terre stabilisée aboutie à de nombreux projets de plus grande envergure, mais les stabilisants ne sont pas toujours respectueux de l'environnement. Il faudrait donc chercher des adjuvants plus naturels tels que l'amidon ou encore des huiles végétales pour améliorer les performances sans pour autant nuire aux qualités du matériau.

Nouvelles techniques mises en œuvre

De nouveaux procédés de mise en œuvre émergent encore aujourd'hui. Les chercheurs et les constructeurs veulent aller encore plus loin en créant des formes complexes avec de la terre. Pour cela ils utilisent la technique de la terre coulée. Cette innovation s'inspire du béton tout en gardant les avantages de la terre. Sa mise en œuvre fluide dans le coffrage lui permet de prendre tout type de forme. Cette technique peut être appliquée à des murs porteurs, des chapes ou encore des éléments préfabriqués⁶¹.

Sur le même principe que le béton, la terre projetée voit aussi le jour. Cette technique expérimentale reste en phase de recherche et de prototype dans des laboratoires d'Amaco et CRAterre. Le but étant de réaliser des enduits épais, cette technique permet une mise en œuvre plus rapide même dans des zones complexes. La terre projetée permettrait d'obtenir des enduits ou des parois épaisses sans pour autant passer par l'étape du coffrage.

⁶⁰ Ibid

⁶¹ CHATEL OT, Pierre. La construction en terre crue : techniques modernes. ConstructionDurable.net, 3 décembre 2024. Disponible en ligne : <https://www.constructiondurable.net/construction-en-terre-crue/>, consulté le 2 novembre 2025.

⁶² À portée de mains (blog Géomaterio). Qu'est-ce que la terre allégée ?. Blog Géomaterio, 12 décembre 2022. Disponible en ligne : <https://blog.geomaterio.fr/materiaux/quest-ce-que-la-terre-allegee/>, consulté le 29 octobre 2025.

La piste de la terre allégée mise au point sous forme de briques pour la rénovation de la maison 24h pourrait être poursuivie et envisagée à plus grande échelle. Ce mélange de terre et de fibres permet de réduire le poids de la terre, tout en la rendant isolante. Cette technique, qui est une dérive du torchis permet à la terre d'être encore plus performante. Les fibres constituent le squelette du mélange et la terre sert uniquement de liant. La terre allégée est une technique non porteuse utilisée pour des cloisons intérieures ou pour réaliser des corrections thermiques en jouant le rôle d'isolant⁶².

Comme partout aujourd'hui, la terre crue entre, elle aussi, dans l'ère du numérique⁶³. En effet, des chercheurs italiens et américains travaillent sur le développement de l'impression 3D à partir de ce matériau ancestral. Ces recherches, menées par un leader italien de l'impression 3D, ont abouti à la réalisation d'un prototype d'habitation de 60 m². Ce procédé nommé Tecla, mélange de technologie et d'argile, est eco-durable et respectueux de l'environnement avec une production qui n'engendre aucun déchet⁶⁴.

Cette innovation a redonné un nouveau souffle à la terre dans l'industrie, suscitant beaucoup d'attention. Cette technique permet d'offrir une liberté de conception également développée par l'université de Nantes⁶⁵.

63 RANGEARD, Damien ; PERROT, Arnaud ; COURTEILLE, Eric. Impression 3D de terre crue. DiXite3dPrint : Fabrication additive pour la construction. Quelle actualité nationale ? École des Ponts ParisTech, janvier 2019.

64 FAUCOMPRÉ, Pascal. Construction 3D en terre crue : technologie low-tech du futur ? Build Green – France, 2025. Disponible en ligne : <https://www.build-green.fr/construction-3d-en-terre-crue-technologie-low-tech-du-futur/>, consulté le 16 octobre 2025.

65 PAQUET, Élodie. Construire l'avenir avec le passé : l'impression 3D en terre crue, une solution décarbonée pour l'habitat de demain. EchoSciences – Pays de la Loire, 12 mai 2025. Disponible en ligne : <https://www.echosciences-paysdelaloire.fr/articles/construire-l-avenir-avec-le-passe-l-impression-3d-en-terre-crue-une-solution-decarbonee-pour-l-habitat-de-demain>, consulté le 26 octobre 2025.



Figure 74 : Impression 3D en terre crue

Mur trombe

Une autre innovation a permis d'aboutir à un mur trombe en terre. Ce système a été mis en place dans le but de réduire les besoins de chauffage. Ce dispositif permet de chauffer l'air situé derrière un vitrage et de le redistribuer dans la pièce adjacente. L'air chaud est diffusé par le haut du mur, tandis que l'air frais est aspiré par le bas, puis réchauffé avant d'être renvoyé dans la pièce, assurant ainsi une circulation naturelle de chaleur et un confort thermique optimal. Ce système généralement pensé avec d'épais murs en béton a récemment été pensé en terre crue dans certains projets.

Combinant ainsi les avantages du chauffage solaire passif avec les propriétés thermiques et hygrométriques de la terre. La terre crue, grâce à son inertie thermique élevée, emmagasine la chaleur captée par le vitrage et la restitue lentement à l'intérieur du bâtiment, tandis que ses propriétés hygrométriques contribuent à réguler l'humidité et à maintenir un confort intérieur optimal. Plusieurs réalisations illustrent cette approche : la médiathèque Théodore-Monod à Betton(35) dispose d'un mur en terre crue de 45 cm derrière un vitrage sud, assurant une économie énergétique notable ; l'atelier mécanique du campus Beaulieu à Rennes intègre un mur trombe en bauge, utilisant la terre crue et la paille pour réguler la température intérieure ; enfin, les projets de recherche Écomaterre en Bretagne explorent également cette combinaison pour des bâtiments bioclimatiques durables. Ces exemples démontrent que la terre crue peut être efficacement intégrée dans un mur Trombe, offrant à la fois performance énergétique, confort thermique et respect de l'environnement⁶⁶.

⁶⁶ Les déclinaisons du mur Trombe. Cahiers Techniques du Bâtiment, 7 octobre 2025. Disponible en ligne : <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/les-declinaisons-du-mur-trombe.34897>, consulté le 7 octobre 2025.

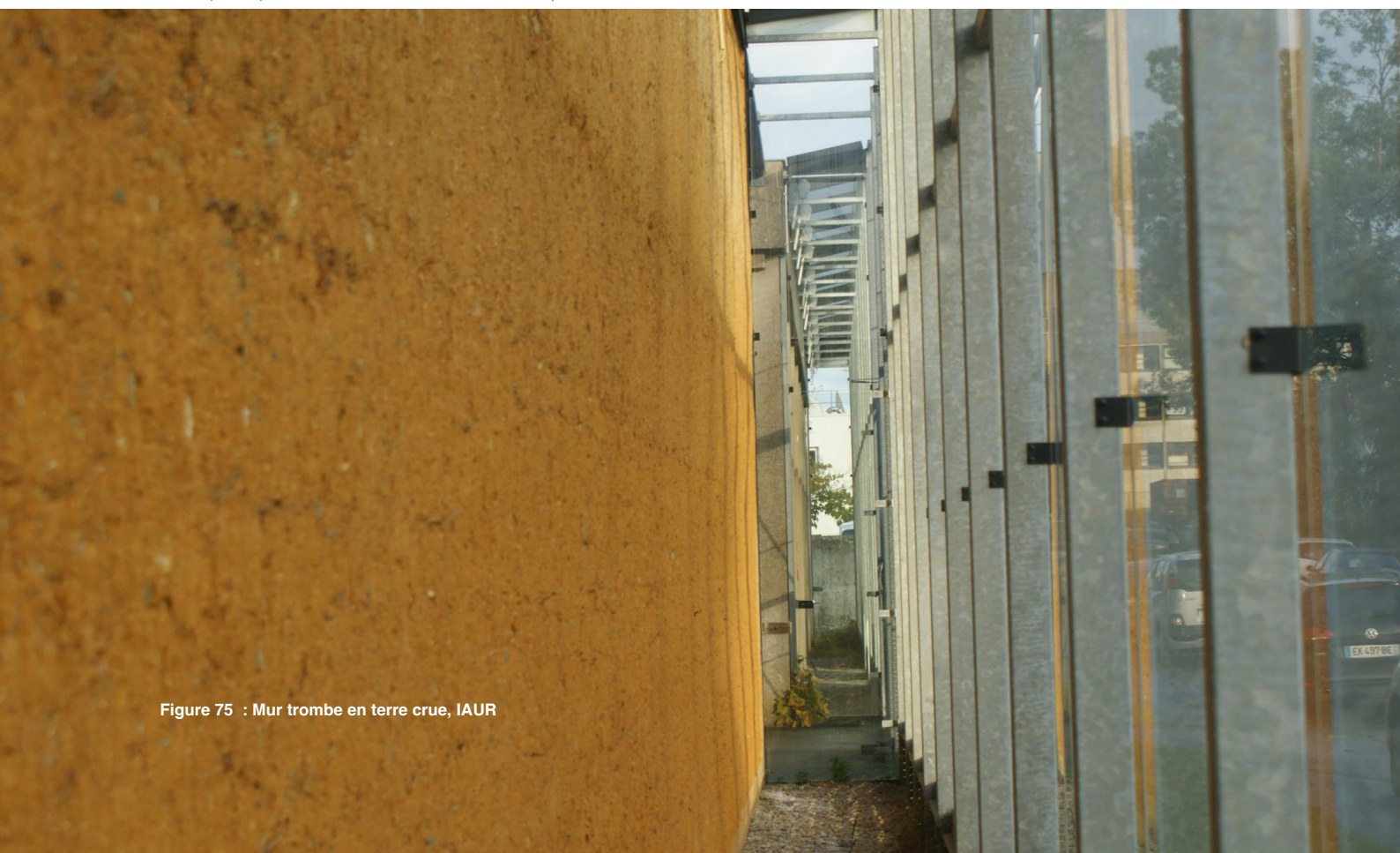


Figure 75 : Mur trombe en terre crue, IAUR

III.1.2.1 Savoir-faire traditionnel

Technique vernaculaire

Certaines techniques existent depuis des siècles et sont toujours utilisées aujourd'hui. Ces techniques anciennes, toujours adaptées au contexte actuel restent toujours aussi efficaces. On peut prendre exemple sur le pisé qui existe depuis de nombreux siècles et qui est toujours utilisé aujourd'hui. En effet cette technique très performante permet de mettre en œuvre des murs de terre compactée avec une inertie et une robustesse considérable.

Le torchis est aussi une technique ancestrale qui a évolué jusqu'à nos jours pour nous permettre aujourd'hui de créer des murs plus légers, adaptés aux climats plutôt humides.

Dimension culturelle

Ces savoir-faire ne sont pas seulement des techniques, il y a derrière une dimension communautaire identitaire et humaine. Cette dimension collective se traduit par la transmission du savoir de générations en générations, souvent directement sur le chantier. Au delà de cette transmission collective, la terre crue c'est aussi une culture. Pour de nombreuses personnes, la terre crue est synonyme d'entraide, de lien social. En effet c'est un matériau local disponible et gratuit, accessible par tous. Il engendre des actes collectifs et solidaires. La terre crue dépasse la simple dimension technique.

Chaque région a développé sa propre façon de travailler la terre en l'adaptant au type de terre de la région mais aussi au climat, au paysage et aux coutumes locales. On peut prendre l'exemple du pisé dans les alpes ou encore la bauge en Bretagne et pour finir on retrouve beaucoup d'adobes en Afrique Nord et en Amérique latine. Toutes ces techniques et ces évolutions racontent l'histoire du territoire, du sol et de la matière. La terre crue ce n'est pas qu'une question environnementale, la matière crée un lien entre l'habitant et son territoire.

Combinaison tradition innovation

Pour poursuivre dans la dynamique que connaît la terre crue dernièrement, il est important de développer la formation autour de ce matériau aussi bien chez les artisans que chez les architectes et les ingénieurs. Cette formation met en avant le rôle des ateliers et des chantiers participatifs pour sensibiliser les praticiens.

L'avenir de la terre crue qui était encore incertain il y a peu, s'impose de plus en plus. Les laboratoires expérimentent de plus en plus de nouvelles techniques, et les résultats sont de plus en plus performants. Pour continuer dans cette logique de performance, il ne faut pas trop s'éloigner des traditions en composant avec les savoirs vernaculaires, mais il faut aller encore plus loin et les enrichir avec des apports technologiques maîtrisés. On peut ici discuter de l'hybridation de la terre crue. On s'est rendu compte que la terre crue est un matériau avec une bonne inertie, mais pourtant très peu isolant. Le coupler avec un matériau isolant tel que la paille permet de profiter des avantages de chacun et donc d'obtenir un matériau avec une bonne inertie tout en étant isolant.

On peut prendre exemple sur Martin Rauch qui a fait de nombreux tests dans sa propre maison. Cette dernière a été en partie préfabriquée en usine, ce qui a permis une grande précision dans la conception. Pour autant elle est totalement faite de terre. Un autre exemple, Philippe Madec cherche à valoriser le matériau local tout en gardant une approche low-tech dans son projet de pôle culturel en Occitanie.

L'objectif aujourd'hui est de faire dialoguer le passé et le futur dans la conception en terre, dans une logique de durabilité et d'innovation responsable.

III.2 Perspectives pour l'architecture durable

Grâce à ces propriétés physiques et hygrométriques, la terre crue est un matériau important dans la recherche d'une architecture plus durable. De par son utilisation, on est capable de réduire le besoin énergétique tout en assurant un confort thermique. Dans une approche passive la terre crue doit être vue comme un réel outil de conception à prendre en compte dès le début. Cette matière influence les ambiances intérieures, et la relation à son environnement. Toutes ces données sont à prendre en compte avant de se lancer dans la conception d'un bâtiment de la sorte.

III.2.1 La terre crue, matériau clé dans les constructions passives et bioclimatiques

III.2.1.1 Un matériau naturellement bioclimatique

La terre crue se distingue par ses qualités physiques, qui en font un matériau bioclimatique. Grâce à sa forte inertie thermique, elle emmagasine la chaleur durant la journée pour la restituer lentement la nuit, stabilisant ainsi la température intérieure et réduisant le recours au chauffage ou à la climatisation. Sa porosité et sa capacité hygroscopique permettent également de réguler naturellement le taux d'humidité, assurant un confort intérieur plus ou moins constant tout au long de l'année.

Contrairement à d'autres matériaux plus "techniques", la terre agit ici comme une matière vivante, capable d'interagir avec le climat et le corps humain. Dans une approche passive, elle devient un véritable outil de conception : bien orientée et intégrée dès la phase de projet, elle participe à la réduction des besoins énergétiques tout en favorisant des ambiances intérieures saines et agréables.

Ces qualités font de la terre crue un matériau naturel à intégrer aux stratégies bioclimatiques, particulièrement adapté aux régions où les variations de température et d'humidité sont marquées.

La maison 24h a été réalisée il y a presque quarante ans. Elle n'a pas été sujette à une analyse du confort thermique, à cette époque le confort thermique et la crise environnementale n'étaient pas des notions abordées. Si le bâtiment avait été réfléchi avec toutes les notions passives évoquées, il aurait été beaucoup plus agréable à vivre aujourd'hui.

III.2.1.2 Contribution à l'efficacité énergétique

Avec l'ensemble des éléments abordés précédemment, il est clair que la performance des constructions en terre crue repose sur l'inertie thermique du matériau, mais aussi sur les dispositifs passifs et les principes bioclimatiques. L'alliance de ces différentes approches permet de réduire la consommation énergétique d'un bâtiment, tout en garantissant un confort intérieur.

Une orientation étudiée en fonction des apports solaires, associée à une ventilation naturelle, optimisent le fonctionnement du bâtiment. Ces stratégies sont encore plus efficaces lorsqu'elles sont combinées aux capacités de la terre crue : la masse thermique du matériau absorbe les excès énergétiques le jour pour les redistribuer progressivement la nuit, créant ainsi un équilibre thermique naturel sans avoir recours à des systèmes mécaniques complexes.

Sur le plan environnemental, l'enjeu est majeur. Reddy et Mani (2013) estiment que 40 % des émissions mondiales de CO₂⁶⁷, proviennent du secteur du bâtiment, entre la production des 12 matériaux, la construction et l'exploitation des édifices. Cette réalité souligne la nécessité de recourir à des alternatives écologiques telles que la terre crue.

Comparée à des matériaux conventionnels comme le béton ou l'acier, la terre crue présente une empreinte environnementale faible. Extraite localement, peu transformée et souvent réutilisable, elle nécessite très peu d'énergie pour sa mise en œuvre. Son utilisation limite ainsi les

émissions de gaz à effet de serre liées à l'extraction, au transport et à la fabrication industrielle. De plus, la terre crue est un matériau recyclable, biodégradable et réversible, ce qui en fait un atout majeur dans la perspective d'une économie circulaire du bâtiment. Les structures construites en terre peuvent être réparées, transformées ou même restituées à leur environnement sans générer de déchets polluants.

Ainsi, au-delà de ses qualités techniques, la terre crue s'impose comme un matériau clé de la transition écologique, conciliant performance thermique, faible impact environnemental et durabilité sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment⁶⁸.

67 ZONGO Zoulbi Léon. L'amélioration des processus d'évaluation des impacts environnementaux des matériaux locaux (terre crue) : vers une prise en compte efficace du développement durable au Burkina Faso. 2025). Journal of Business and Technologies,

68 KIKI, Marius, LABOREL-PRÉNERON, Anne, AUBERT, Jean-Emmanuel, MAGNIONT, Camille. Thermal and hygric properties of unfired earth bricks: A key material for sustainable construction. Construction and Building Materials, vol. 374, 2023

III.2.1.3 Compatibilité avec les constructions passives

La terre crue peut s'inscrire dans la logique des constructions passives, non pas comme un matériau d'enveloppe, mais comme un acteur du confort thermique et de la sobriété énergétique. Son rôle n'est pas de remplacer les dispositifs passifs, mais de les compléter. En effet, ses qualités d'inertie permettent d'amplifier l'efficacité des stratégies architecturales déjà mises en œuvre, comme l'orientation solaire ou la ventilation naturelle.

L'intérêt de la terre crue est double dans un bâtiment. En effet, sa capacité à lisser les variations de température réduit les besoins en systèmes mécaniques de régulation. Dans des contextes climatiques contrastés, cette stabilité thermique naturelle contribue à maintenir un confort intérieur sans recours important au chauffage ou à la climatisation.

De plus, la démarche passive vise à minimiser la consommation énergétique sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. La terre crue, matériau local, peu transformé et ré-employable, s'inscrit parfaitement dans cette logique de durabilité et d'économie de ressources. Elle permet ainsi de concevoir des architectures à la fois performantes, écologiques et profondément ancrées dans leur territoire.

Enfin, la compatibilité entre architecture passive et terre crue ouvre de nouvelles perspectives de conception architecturale contemporaine, où la performance énergétique ne repose plus uniquement sur la technologie, mais sur une compréhension fine de la matière et du climat. Cette approche redonne tout son sens à l'expression d'une architecture durable, sobre et résiliente.

En résumé, la terre crue peut être considérée comme un élément important de l'architecture durable, capable d'assurer confort, performance énergétique et faible impact environnemental. Ses qualités, combinées aux stratégies passives et aux principes bioclimatiques, en font un matériau adapté aux exigences contemporaines. Au-delà de ces considérations techniques, il est essentiel de s'intéresser à son potentiel d'application dans d'autres climats et contextes sociaux, ainsi qu'aux enjeux culturels et humains qui accompagnent sa diffusion à l'échelle mondiale⁶⁹.

69 ATELIER ALP. L'inertie des murs en terre crue. Atelier ALP, consulté en ligne le 11 octobre 2025

III.2.2 Potentiel d'application à divers régions climatiques et contextes sociaux

La terre crue peut convenir à de nombreuses régions, nous avons pu remarquer qu'elle peut répondre à de nombreuses situations de façon plus ou moins performante. Grâce à sa diversité constructive et à son faible impact environnemental, la terre crue est un matériau modulable capable de s'adapter à des projets très divers allant de l'habitat rural jusqu'aux bâtiments publics contemporains.

III.2.2.1 Adaptation aux climats variés mais exigeance

De nos jours les bâtiments font face des climats très divers dans un même lieu. On l'a vu pour la Maison 24h à Saint Martin d'Hères, les températures hivernales sont largement négatives et les températures estivales peuvent dépasser les 40°C. Ces différences de température complexifient la performance des bâtiments qui doit en hiver garder la chaleur mais en été l'extraire.

Zone chaude

Dans les zones où l'on souffre principalement de la chaleur on cherche des techniques pour que l'air passe, comme c'est le cas dans le dispositif de murs ventilés. Cet élément de façade facilite le rafraîchissement du bâtiment, c'est plus ou moins le même principe que le mur trombe, l'air chaud monte et s'échappe de la lame d'air pour laisser la place à un air plus frais et par conséquent rafraîchir la pièce en façade. Ce genre de dispositif, combiné à une toiture protectrice permet aux zones tel que l'Afrique ou encore l'Argentine, d'avoir des bâtiments plus performants et agréables à vivre.

Zone froide

Dans les zones plus froides, comme en Europe centrale, on construit généralement des murs massifs en pisé par exemple, qu'on vient isoler pour éviter les déperditions thermiques. C'est ce qui a été fait sur la toiture de la maison 24h. La terre a été isolée pour empêcher les déperditions et réduire les besoins de chauffage⁷⁰.

On remarque donc que la terre n'a pas les mêmes performances, cela diffère en fonction de l'humidité de la variation thermique mais également en fonction du type de terre et de techniques. En effet dans les climats avec une humidité assez importante, on va venir stabiliser la terre pour la protéger. Toujours dans cette perspective de protéger la terre, on va venir créer des débords de toiture pour protéger les parois.

Comme nous l'avons vu à Saint Martin d'Hères dans la maison 24h, lorsque les températures deviennent négatives l'inertie de la terre ne suffit plus, on va donc venir associer la terre à un isolant idéalement biosourcé comme de la paille, du chanvre ou même du liège.

⁷⁰ ADEME. Bâtiment : comment rénover et construire face au dérèglement du climat ? Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique, 2023. Disponible en ligne : <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/secteurs-d-activites/batiment-particulier>, consulté le 11 octobre 2025.

Dans les régions plus arides, l'inertie de la terre crue est un avantage majeur. La terre va se suffire à elle même. Il faut bien évidemment être vigilant à l'exposition ainsi qu'aux ouvertures, pour ne pas engendrer de surchauffe du bâtiment.

Comme nous pouvons le comprendre ici, la terre n'est pas un matériau miraculeux. Elle s'adapte à de nombreuses situations climatiques, mais avant tout, il faut prendre le temps de connaître la terre dont on dispose et ce qu'on veut en faire. Il faut comprendre le climat ainsi que la ressource⁷¹.



71 APUR. Inertie des murs selon les techniques constructives à Paris. Cahier n° 240-07, APUR, 2010, page 6
Figure 76 : Chantier participatif Amacò
Photographe : Pierre Yves BRUNAUD

III.2.2.2 Adaptation au contexte social et économique

Derrière la terre crue se cache une dimension humaine et politique. En effet, ce matériau reste souvent associé à la pauvreté ou au sous-développement. On a tous l'image de pays dits « pauvres » construisant leurs bâtiments avec les seules ressources disponibles : la terre. Ce stéréotype renforce l'idée que la modernité passe par le béton, l'acier ou le verre, considérés comme plus performants et « solides ». Cette perception freine encore aujourd'hui l'intégration de la terre crue dans la société contemporaine et dans les politiques publiques de construction⁷².

Pourtant, la terre crue est un matériau économique, inclusif et particulièrement social. Son faible coût, sa disponibilité locale et sa facilité de mise en œuvre en font une ressource idéale pour développer des projets participatifs et autonomes. Contrairement à d'autres techniques de construction, la terre crue ne requiert aucune connaissance technique avancée ni outillage complexe. Les gestes sont simples, souvent manuels, et peuvent être transmis facilement sur le chantier. Cette accessibilité rend la construction en terre accessible à tous — habitants, étudiants, bénévoles — favorisant ainsi une démocratisation du savoir-faire et une appropriation collective du bâti.

Les chantiers participatifs, menés par des structures comme CRAterre, Amàco, ou la Voûte Nubienne, en sont l'illustration. Ces initiatives permettent aux habitants de prendre part activement à la construction de leurs logements ou d'équipements publics, tout en acquérant des compétences pratiques et durables. Elles ne se limitent pas à un simple acte de construction : elles deviennent des espaces d'échanges, d'apprentissages et de cohésion sociale. La simplicité des techniques — pisé, adobe, torchis ou bauge — rend possible une large participation, tout en valorisant la matière locale et les ressources du territoire.

Des projets, tels que l'école METI au Bangladesh conçue par Anna Heringer, ou les écoles de Gandoau Burkina Faso imaginées par Francis Kéré, illustrent cette approche. Dans ces réalisations, les communautés locales participent à toutes les étapes du chantier, du moulage des briques à la mise en œuvre des enduits, permettant une appropriation du lieu et un sentiment de fierté collective. Ces projets montrent qu'avec des techniques simples, un accompagnement adapté et des matériaux accessibles, il est possible de créer une architecture à la fois écologique, esthétique et humaine.

Ainsi, la terre crue devient bien plus qu'un matériau : elle incarne une philosophie du faire ensemble, un outil d'inclusion et d'émancipation. Sa simplicité technique et son ancrage local en font un vecteur de liens sociaux et un levier pour repenser la construction, non pas comme un acte industriel, mais comme un acte collectif et solidaire.

⁷² LÉAL, Émilie, DE CHAZELLES, Claire-Anne & DEVILLERS, Philippe (dir.). Échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue. Volume 5 : Architecture et construction en terre crue – Approches historiques, sociologiques et économiques. Éditions de l'Espérou, 2022

III.2.2.3 Freins institutionnels et techniques au développement

Aujourd'hui, la terre crue dépasse la simple image du matériau traditionnel pour devenir un enjeu culturel et environnemental. Pourtant, malgré son potentiel, elle reste encore marginale dans la construction contemporaine. Les freins ne sont plus seulement techniques, mais surtout institutionnels, normatifs et éducatifs.

L'un des principaux obstacles reste l'absence de normes claires encadrant l'usage de la terre crue. Contrairement au béton ou à l'acier, qui disposent de réglementations bien établies, la terre est souvent considérée comme un matériau "non conventionnel". Cette incertitude complique les démarches administratives et freine son intégration dans les marchés publics. Les maîtres d'ouvrage hésitent à l'utiliser, craignant les refus de permis ou les surcoûts liés à la validation des projets.

À cela s'ajoute la difficulté d'obtenir des assurances. Les compagnies restent frileuses face à un matériau qu'elles connaissent peu et dont la durabilité leur semble incertaine. Cela place souvent les architectes et les constructeurs dans une position délicate : ils doivent multiplier les études expérimentales et les validations techniques, ce qui rallonge les délais et augmente les coûts. Paradoxalement, un matériau millénaire se retrouve aujourd'hui freiné par un système qui privilégie la standardisation plutôt que l'innovation écologique⁷³.

Mais le problème est plus profond : il touche aussi la formation et la transmission des savoirs. Dans la majorité des écoles d'architecture ou d'ingénierie, la terre crue est très peu évoquée, souvent reléguée à quelques conférences ou à des initiatives isolées. On apprend à calculer des structures en béton armé, à modéliser des charpentes métalliques, à choisir des isolants industriels... mais rarement à comprendre le comportement thermique ou hygrométrique d'un mur en pisé. C'est souvent par curiosité personnelle, à travers des stages, des chantiers participatifs ou des lectures, que les étudiants découvrent la richesse de ce matériau.

Cette absence d'enseignement contribue à maintenir la terre crue dans une forme de marginalité : elle reste perçue comme "alternative" alors qu'elle pourrait devenir une référence dans la transition écologique du bâtiment⁷⁴.

Reconnaître la terre, c'est réformer beaucoup de choses, notre manière d'enseigner, de construire et de réglementer. C'est accepter de sortir des logiques industrielles pour redonner de la valeur à la connaissance du terrain, à l'expérimentation et à l'intelligence des matériaux naturels.

73 RÉSEAU ÉCOBÂTIR (et FFB ; SCOP BTP, ENTPE). Règles professionnelles — Enduits sur supports composés de terre crue. Paris : Éditions Le Moniteur, 2013.

74 DE CHAZELLES, Claire-Anne & KLEIN, Alain (dir.). Échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue. Volume 1 : Terre modelée, découpée ou coffrée, Matériaux et modes de mise en œuvre. Paris : Éditions de l'Espérou, 2012

III.2.2.4 Vers une approche contextuelle et collaborative

Plutôt que de chercher à généraliser l'usage de la terre crue, il s'agit de penser chaque projet de manière située, en fonction des ressources, du climat et des pratiques locales. La force de ce matériau réside dans sa flexibilité : il peut se combiner avec des fibres naturelles, des techniques vernaculaires ou des innovations simples, pour créer des solutions hybrides adaptées à chaque territoire.

Cette démarche implique une coopération active entre architectes, ingénieurs, artisans et habitants. Les compétences techniques et les savoir-faire locaux se complètent, tandis que la participation des habitants assure que les bâtiments répondent réellement à leurs besoins. Les chantiers participatifs et les ateliers de formation permettent également de transmettre les connaissances et de renforcer le lien entre le matériau, le territoire et la communauté.

Des initiatives existantes montrent la pertinence de cette approche : Amaco et CRAterre, en France, proposent des formations et des expérimentations concrètes pour former les professionnels et diffuser les savoirs. À l'international, Francis Kéré, au Burkina Faso, illustre comment la terre crue peut être intégrée dans des projets sociaux et éducatifs, tandis qu'Anna Heringer, au Bangladesh, valorise la dimension culturelle et identitaire du matériau dans ses constructions.

Au final, réussir un projet en terre crue ne consiste pas à imposer un modèle unique, mais à concevoir des bâtiments profondément ancrés dans leur territoire, respectueux des ressources locales, ouverts à l'innovation et porteurs de sens pour les communautés qui les habitent⁷⁵.

⁷⁵ CRAterre. Centre international de la construction en terre. Grenoble : CRAterre, 2025. Disponible en ligne : <https://craterre.org/>. Consulté le 10 octobre 2025

III.3 Simulation appliqué la maison 24h sur DIAL +

III.3.1 Présentation de la démarche

À l'aide du logiciel DIAL+, j'ai réalisé une simulation de la maison 24h, notre étude de cas du deuxième chapitre, pour tester différentes améliorations possibles. Cette simulation m'a permis d'évaluer l'impact de certains paramètres sur le confort thermique intérieur. DIAL + nous propose des graphiques de confort thermique avec trois classes de confort différents définies dans la norme européenne EN 15251. La classe I, qui est le niveau où l'attendu est le plus élevé. En général ce confort est attendu dans des espace sensibles tel que des hôpitaux ou des crèches. La classe II est le niveau standard de confort pour les bâtiments neufs. Et enfin la classe III est un niveau modéré acceptable pour les bâtiments existants. Dans cette analyse nous nous concentrerons majoritairement sur la classe II.

Je suis partie de la même base à chaque fois, puis j'ai ajouté un paramètre à la fois : tout d'abord l'isolation, ensuite la protection solaire, et enfin le type de vitrage. En fonction des résultats obtenus, j'ai testé des combinaisons à deux paramètres, puis les trois ensemble, afin de voir leur effet cumulé.

Pour rester réaliste, je me suis appuyée sur l'orientation réelle de la maison et sur l'absence d'isolation des murs extérieurs. Le logiciel a calculé le confort thermique en fonction des relevés de température extérieure de la zone d'étude.

III.3.2 Paramètres de modélisation

Isolation

Lors de sa construction en 1986, la maison 24h n'a pas été isolée. Un ancien ouvrier m'a expliqué que les constructeurs de l'époque pensaient que la terre se suffisait à elle-même. À l'époque, ce matériau était considéré comme révolutionnaire et ne nécessitait aucun ajout pour offrir un confort intérieur acceptable. Il m'a également précisé que l'on ne s'intéressait pas au confort intérieur comme aujourd'hui. C'est pourquoi l'enveloppe du bâtiment ne comportait aucun isolant à l'origine. Seule la toiture a été isolée, mais uniquement pour des raisons pratiques liées au temps et à la main-d'œuvre.

Dans cette simulation, je m'intéresse donc à l'impact d'un isolant de seulement 10 cm sur le confort intérieur. Cette nouvelle couche dans l'enveloppe du bâtiment est susceptible de modifier la régulation thermique de la maison.

Protection solaire

Actuellement, aucun dispositif extérieur n'a été installé pour réguler les apports solaires. Des rideaux ont simplement été ajoutés à l'intérieur, mais ces dispositifs ne suffisent pas : la chaleur pénètre et se diffuse toujours dans l'espace. Dans la simulation, j'ai testé l'ajout de stores à lames extérieures, capables de s'adapter à la saison et à l'intensité du rayonnement solaire. L'objectif est de réduire l'exposition directe aux rayons et, par conséquent, d'éviter la surchauffe estivale.

Type de vitrage

La maison 24h dispose actuellement d'un double vitrage d'origine, moins performant que les standards actuels. Dans cette simulation, j'ai étudié l'impact d'un triple vitrage, plus efficace pour limiter les pertes thermiques et contrôler les apports solaires. Ce changement permet d'évaluer comment le vitrage peut contribuer au confort thermique global de la maison.

Scénario 1	Base			
Scénario 2	Base	Isolation 10cm		
Scénario 3	Base	Protection solaire		
Scénario 4	Base	Triple vitrage		
Scénario 5	Base	Isolation 10cm	Protection solaire	
Scénario 6	Base	Isolation 10cm	Protection solaire	Triple vitrage

III.3.3. Résultats des simulations

Scénario 1 – État actuel

Selon DIAL+, dans l'état actuel, la maison 24h présente un besoin de chauffage de 399,7 kWh/m² par an. La température intérieure dépasse 26°C pendant 75 heures par an. Avec un niveau de confort thermique de classe II, la maison est confortable pendant 1819 heures, dont seulement 595 heures pendant l'occupation réelle du bâtiment. Pour les 6941 heures restantes, la température intérieure est trop froide, impactant le personnel pendant 2265 heures par an. Ces données confirment l'inconfort relevé par les usagers dans le chapitre précédent.

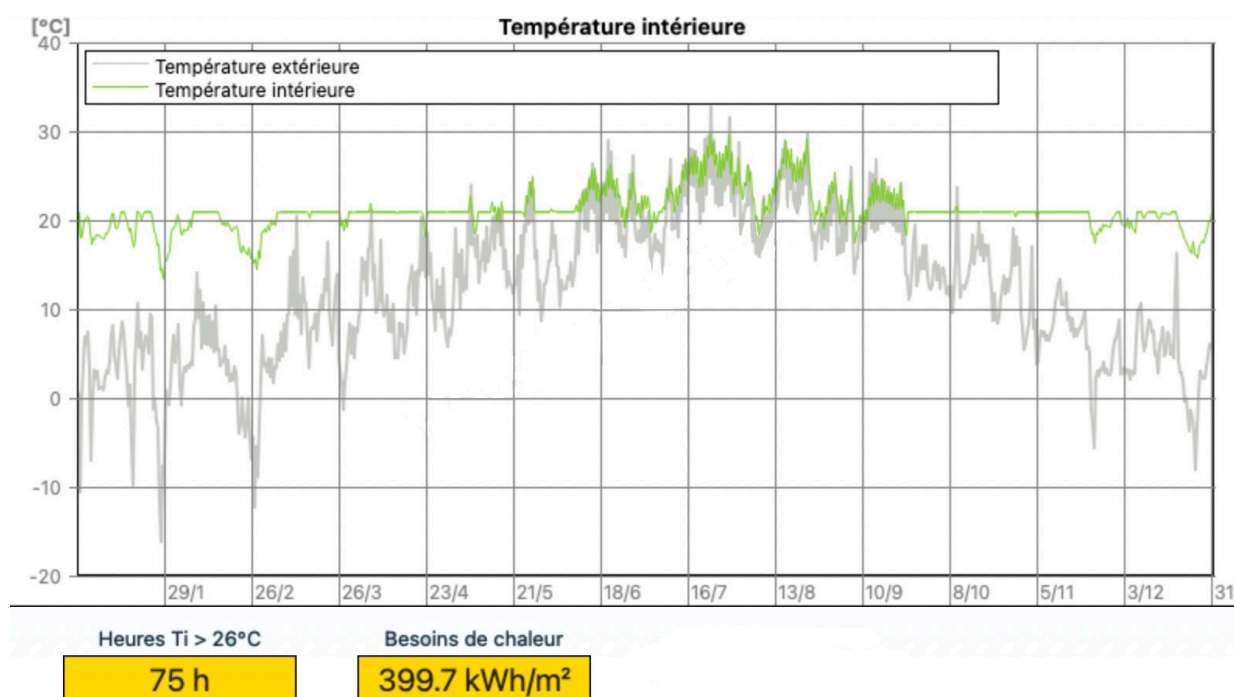


Figure 77 : Graphique de température intérieure et extérieure selon DIAL+ pour le scénario 1

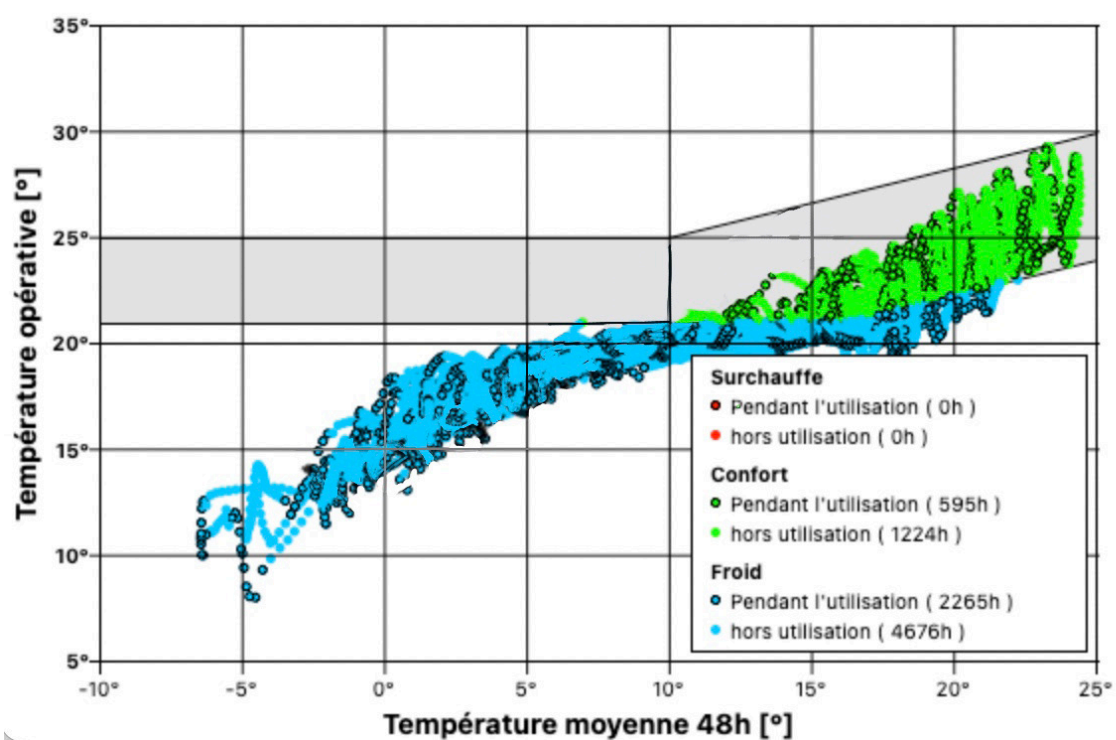


Figure 78 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 1 (Classe II)

Scénario 2 – Isolation de 10 cm

L'ajout d'un isolant de 10 cm améliore le confort. La période de surchauffe augmente légèrement à 160 heures, mais le besoin de chauffage chute drastiquement à 87,5 kWh/m² par an. Le confort thermique de classe II devient optimal, et si l'on adopte la classe I, la température est confortable pendant 3 101 heures, froide pendant 5 637 heures, et trop chaude seulement 22 heures par an.

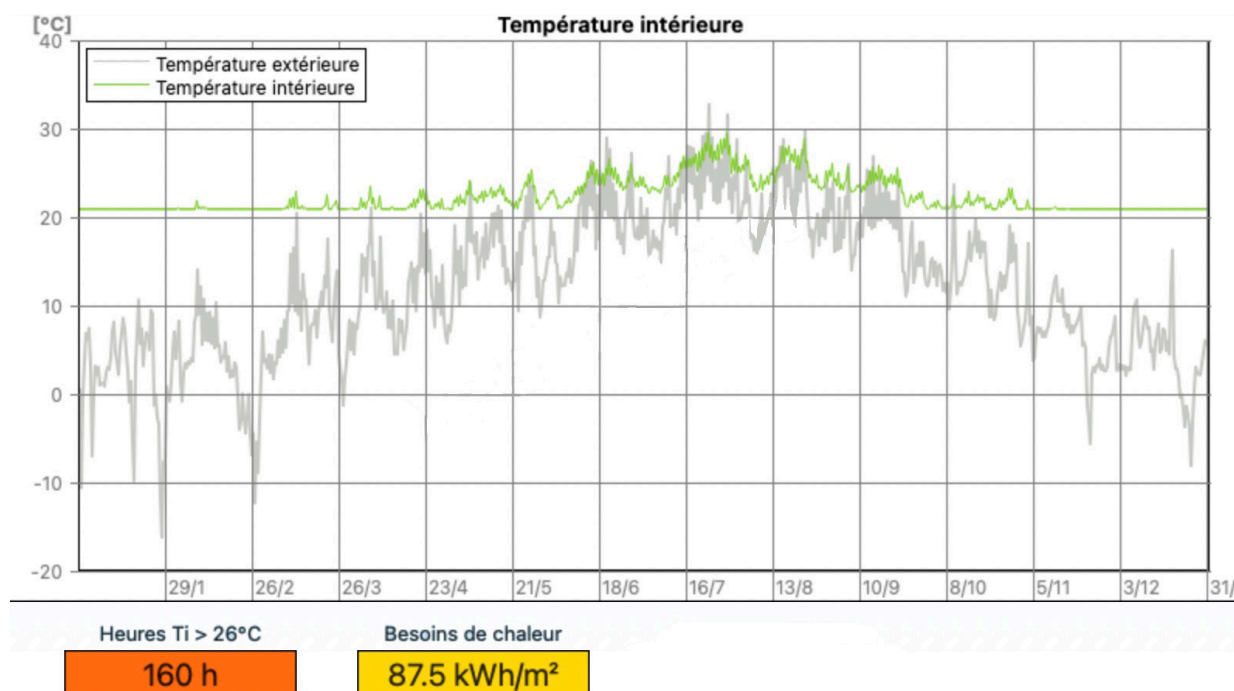


Figure 79 : Graphique de température intérieure et extérieure selon DIAL+ pour le scénario 2

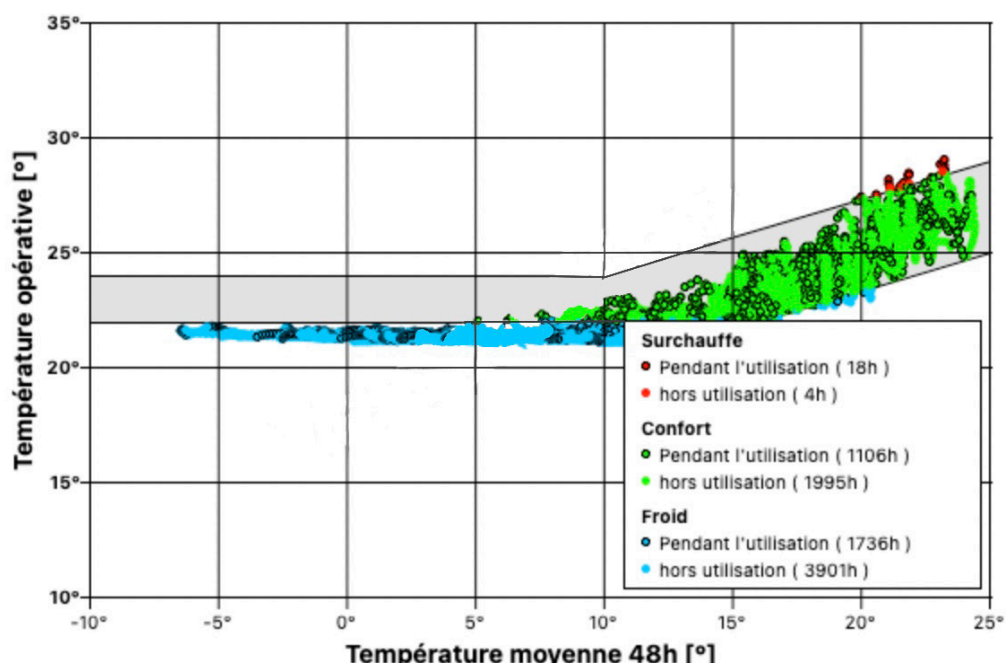


Figure 80 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 2 (Classe I)

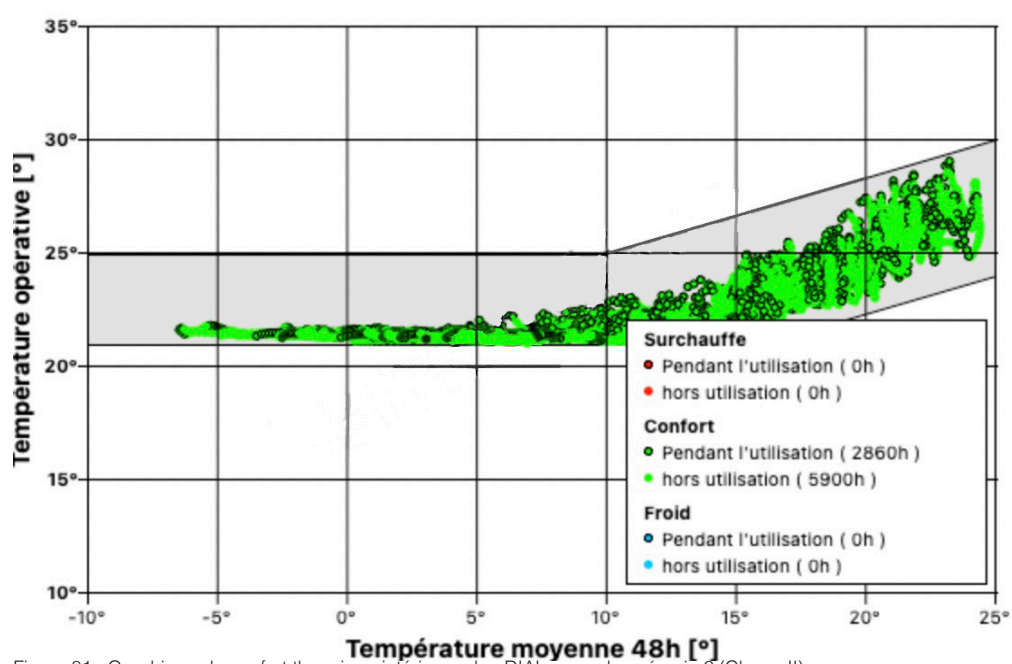


Figure 81 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 2 (Classe II)

Scénario 3 – Protection solaire extérieure

L'ajout de protections solaires extérieures réduit la surchauffe à 57 heures par an. En revanche, le besoin de chauffage augmente légèrement à 445,2 kWh/m² par an. Le confort thermique est respecté pendant 1765 heures, mais il fera frais pendant 6995 heures, dont 2279 heures pendant l'occupation.

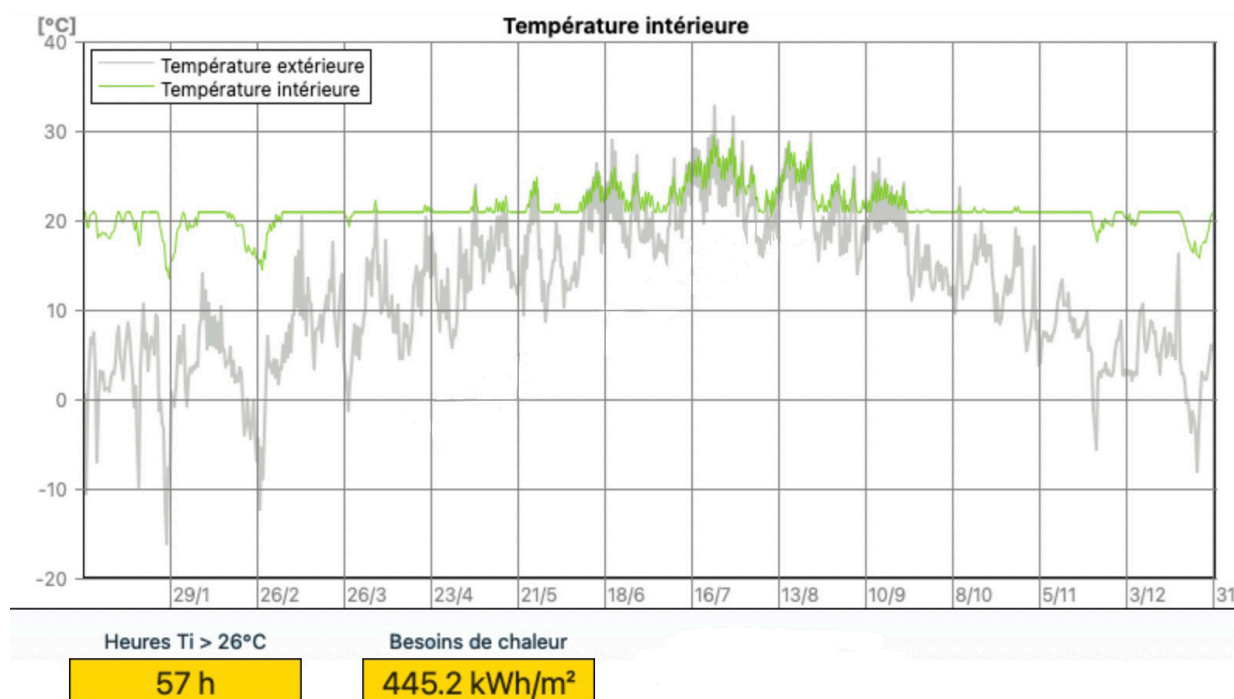


Figure 82 : Graphique de température intérieure et extérieure selon DIAL+ pour le scénario 3

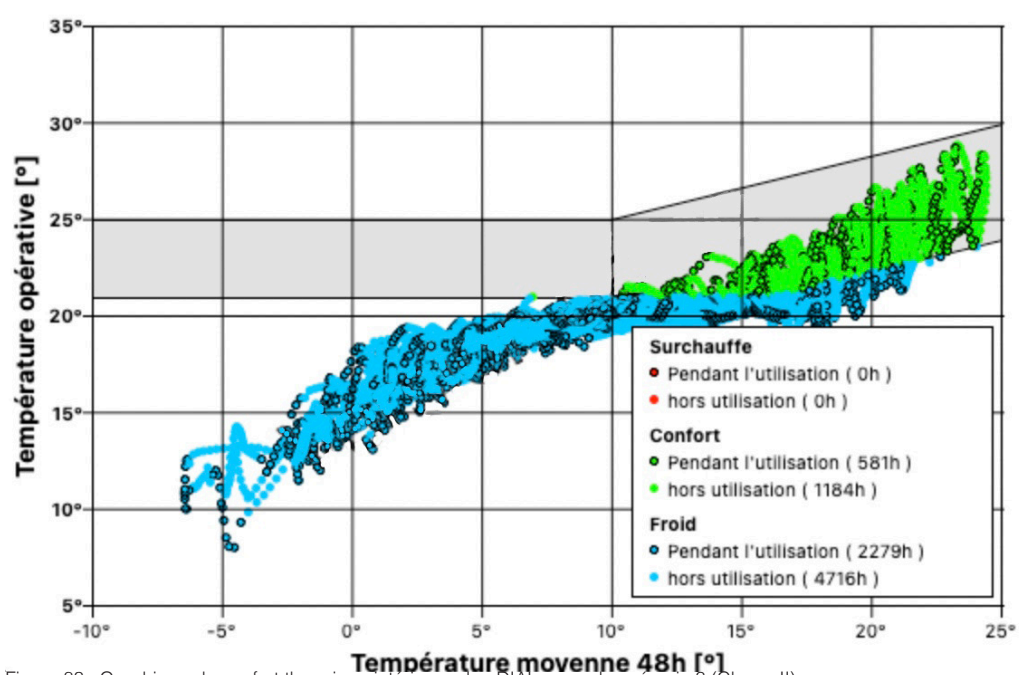


Figure 83 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 3 (Classe II)

Scénario 4 – Passage au triple vitrage

Le remplacement du double vitrage par du triple vitrage réduit légèrement la surchauffe à 76 heures, et le besoin de chauffage reste proche de l'état actuel (397,8 kWh/m² par an). Le confort thermique est assuré pendant 1460 heures, mais seulement 456 heures pendant l'occupation. Pendant les 7300 heures restantes, les températures sont inférieures au confort.

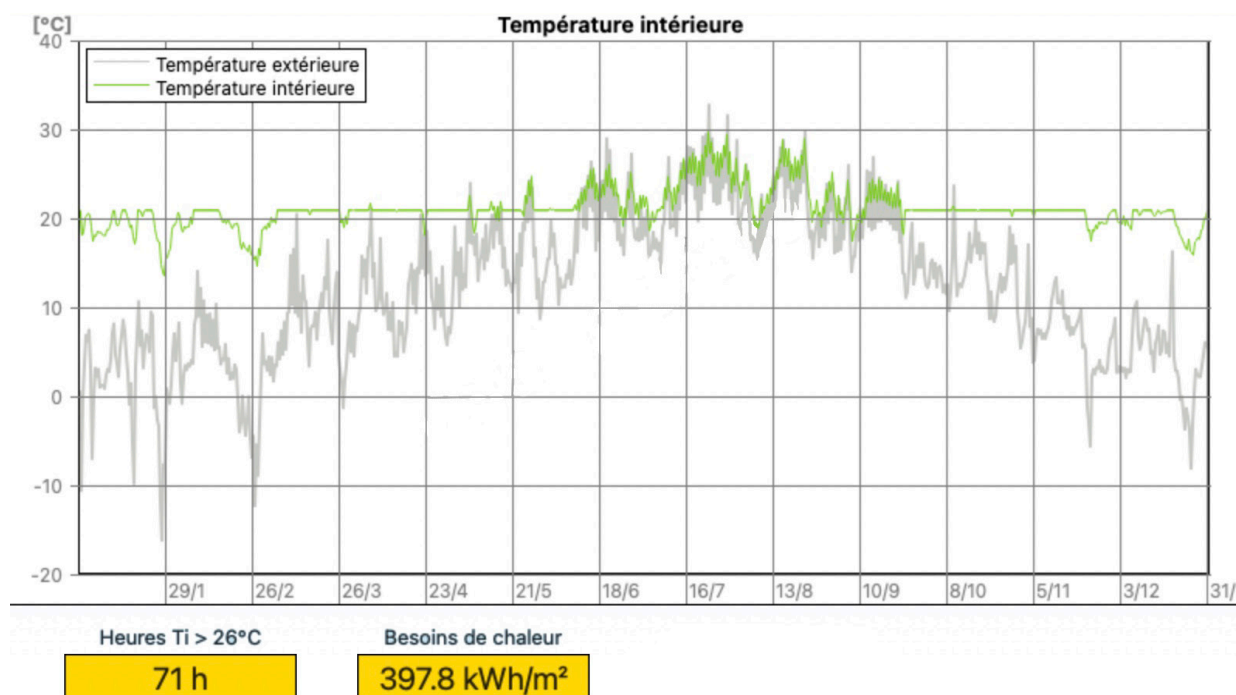


Figure 84 : Graphique de température intérieure et extérieure selon DIAL+ pour le scénario 4

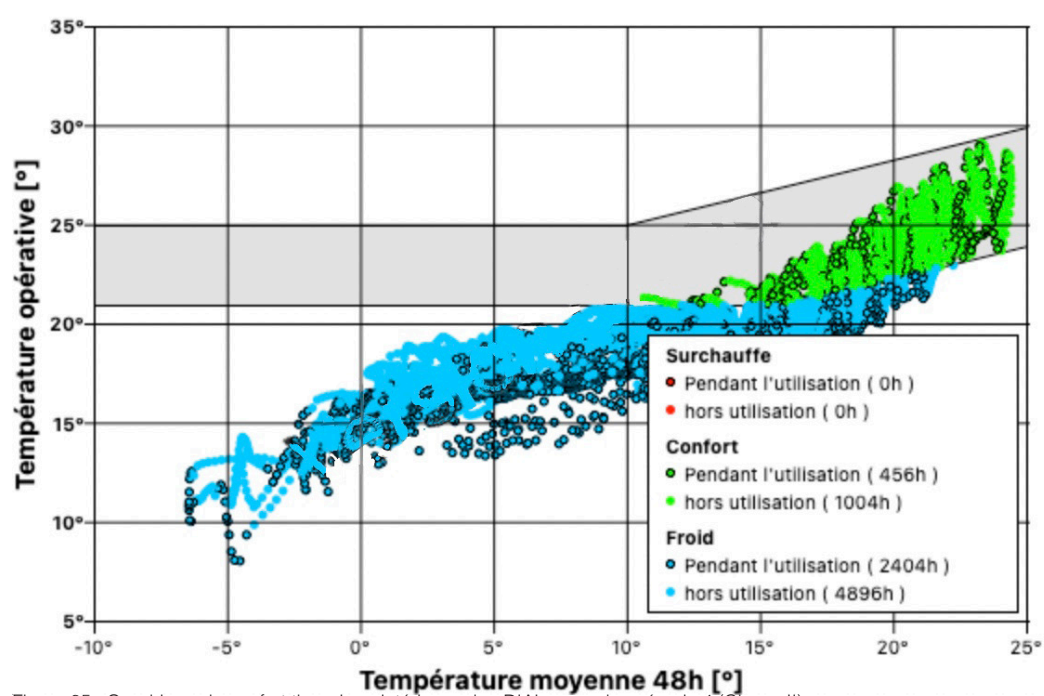


Figure 85 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 4 (Classe II)

Scénario 5 – Isolation + protection solaire

En combinant l'isolation de 10 cm et les protections solaires extérieures, la surchauffe est réduite à 48 heures par an et le besoin de chauffage tombe à 88,8 kWh/m² par an. Avec la classe II, le confort intérieur est optimal tout au long de l'année. Si on augmente le niveau d'exigence à la classe I, les usagers auront froid pendant 1860 heures, soit 6230 heures de froid sur l'année.

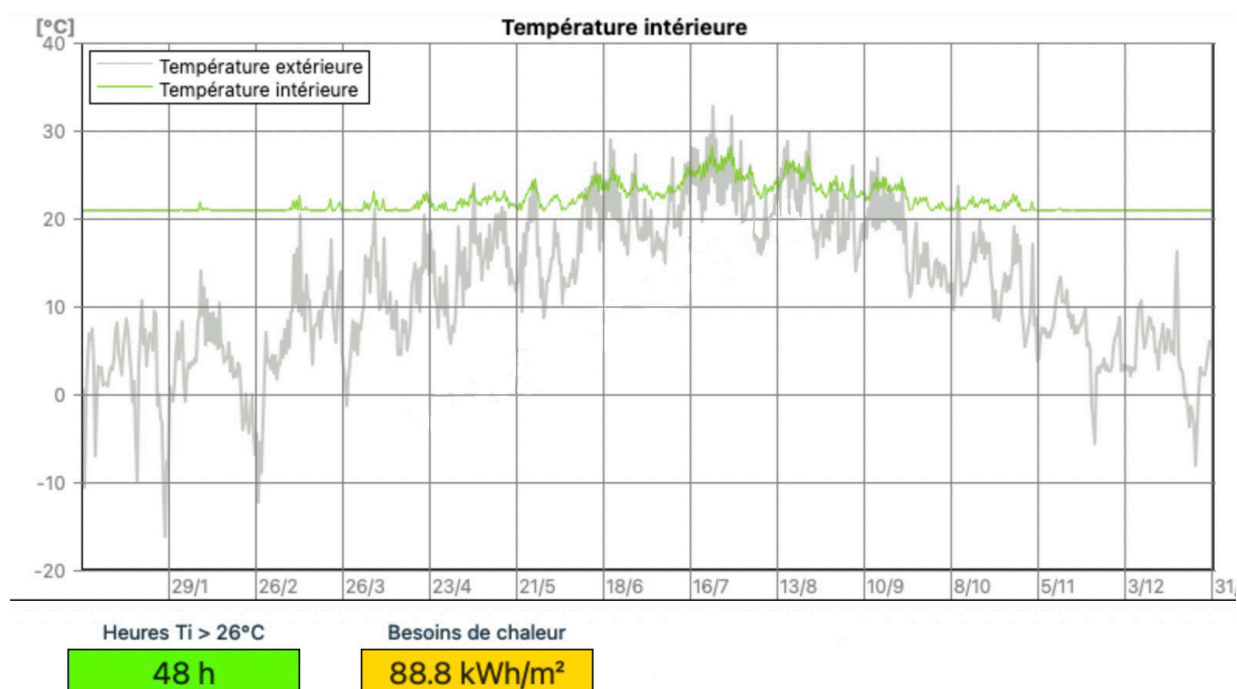


Figure 86 : Graphique de température intérieur et extérieur selon DIAL+ pour le scénario 5

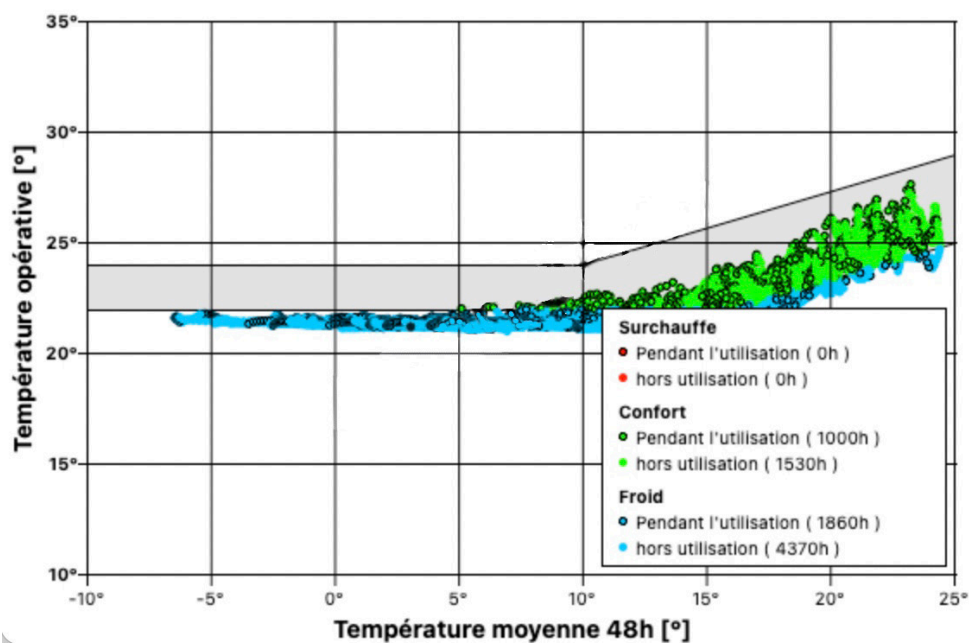


Figure 87 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 5 (Classe I)

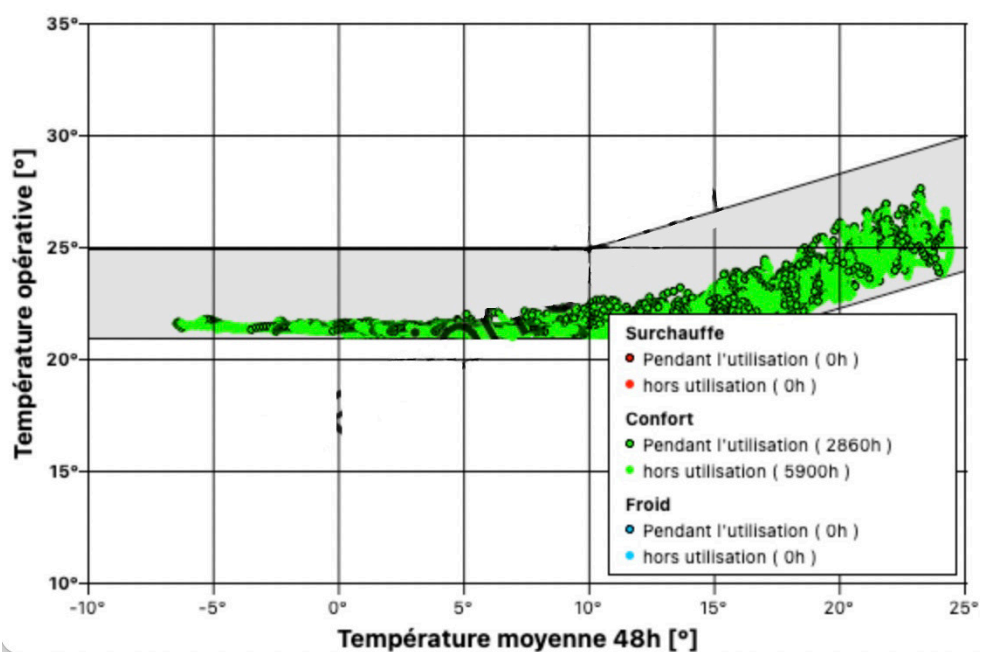
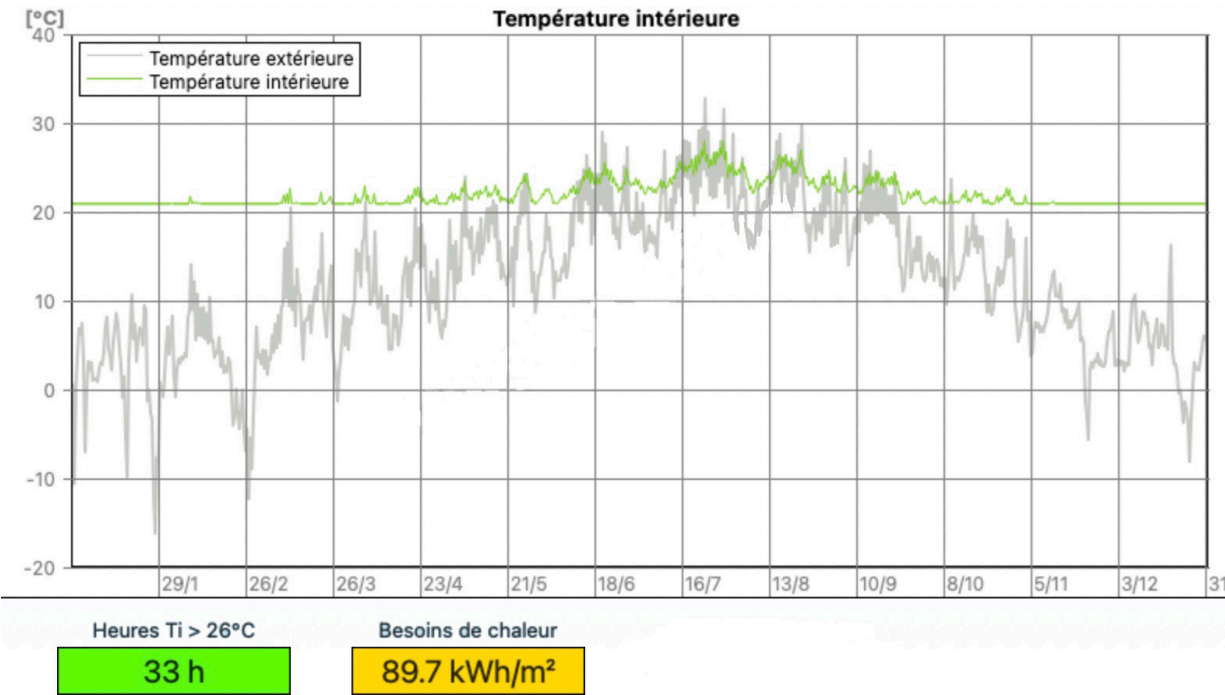


Figure 88 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 5 (Classe II)

Scénario 6 – Combinaison des trois dispositifs

En cumulant isolation, protection solaire et triple vitrage, la surchauffe est limitée à 33 heures par an et le besoin de chauffage annuel est de 89,7 kWh/m². Le confort thermique de classe II est respecté, et si l'on passe au niveau classe I, il fera froid pendant 6543 heures sur l'année⁷⁶.



⁷⁶ DIAL+. Logiciel DIAL+ pour la simulation énergétique et lumineuse des bâtiments. Estia SA, EPFL Innovation Park, Suisse, 2023
Figure 89 : Graphique de température intérieur et extérieur selon DIAL+ pour le scénario 6

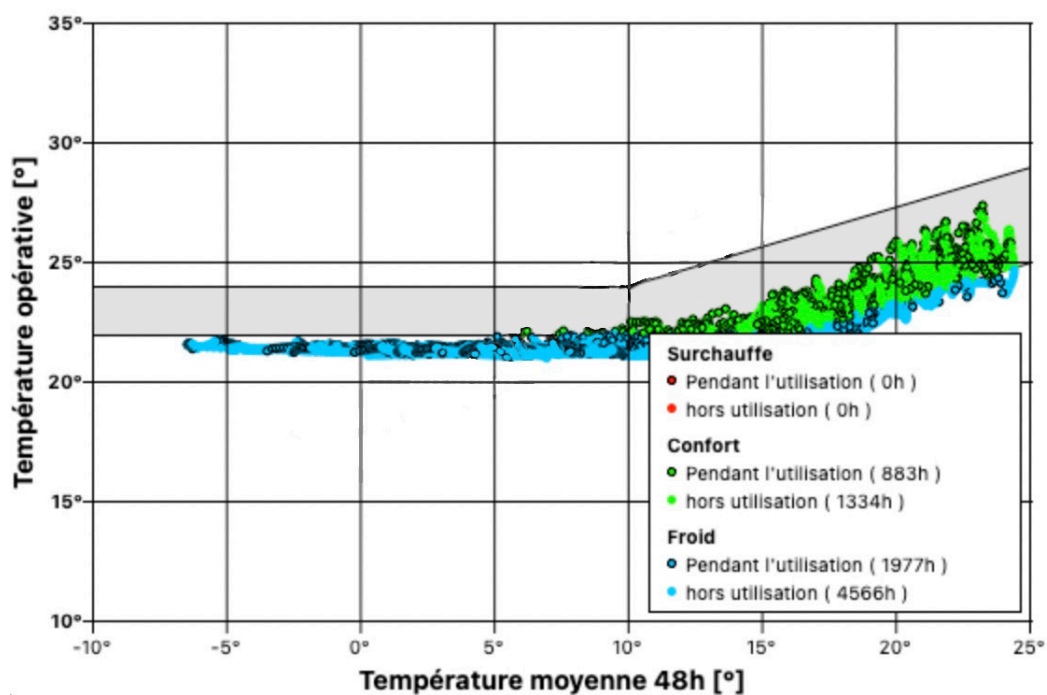


Figure 90 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 6 (Classe I)

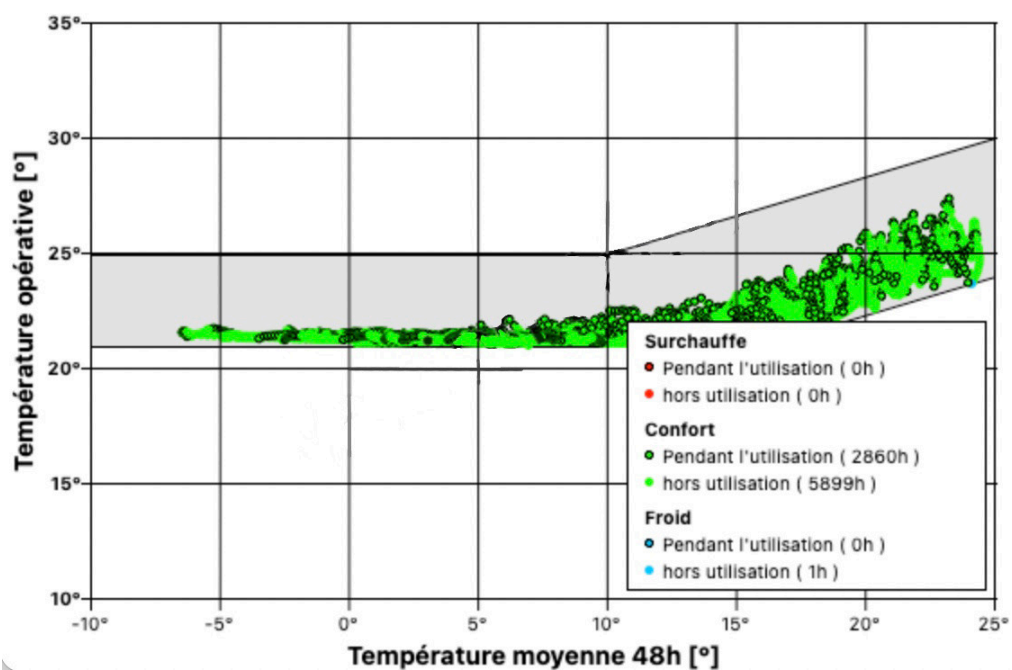


Figure 91 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 6 (Classe II)

III.3.4. Interprétation

L'analyse de ces différents scénarios montre que l'efficacité de ces dispositifs est nettement renforcée lorsqu'ils sont combinés. Pris individuellement, chacun présente des limites : l'isolation seule augmente la période de surchauffe, les protections solaires seules entraînent une hausse des besoins de chauffage, et le triple vitrage a finalement peu d'impact, que ce soit sur la surchauffe, ou sur les pertes thermiques.

C'est pourquoi j'ai choisi de tester plusieurs combinaisons afin d'exploiter les avantages de chacun. Dans le scénario 5, qui associe l'isolation de 10 cm et les protections solaires extérieures, la surchauffe annuelle passe de 75 heures à 48 heures, tandis que le besoin de chauffage chute de 399,7 kWh/m² à 88,8 kWh/m². Le graphique de confort thermique de niveau standard montre un confort intérieur quasi optimal, confirmant que cette combinaison améliorerait nettement le confort des usagers, aussi bien en été qu'en hiver.

Enfin, si l'on se penche sur le dernier scénario, qui combine les trois dispositifs, on pourrait penser qu'il est idéal... mais ce n'est pas tout à fait le cas. La surchauffe diminue encore légèrement, atteignant 33 heures par an au-dessus de 33 °C, mais les besoins de chauffage augmentent un peu par rapport au scénario 5. Le confort de classe II reste bon, mais si l'on passe à la classe I, plus exigeante, le scénario 5 présente 6230 heures d'inconfort liées au froid, contre 6543 heures pour le scénario 6.

Ces résultats nous amènent à nous questionner sur l'intérêt du triple vitrage : son apport reste faible face à son coût. L'association de l'isolation et des protections solaires semble donc suffisante pour assurer un bon confort thermique, été comme hiver. Ces scénarios montrent surtout que la terre crue est un matériau très performant, mais qu'il faut la comprendre et l'accompagner. Seule, elle peine à atteindre un équilibre thermique ; c'est l'association de la matière, de la conception et des dispositifs passifs qui permet d'obtenir un bâtiment réellement performant.

Malgré des conditions climatiques parfois extrêmes, la terre crue conserve un rôle essentiel dans la régulation du confort intérieur. La démarche menée avec DIAL+ met en évidence ses capacités, même si le logiciel reste un modèle simplifié et présente certaines limites.

Elle permet néanmoins de confirmer que les dispositifs passifs, lorsqu'ils sont bien pensés et combinés à l'inertie de la terre, améliorent significativement la performance du bâtiment et renforcent la pertinence d'une approche bioclimatique.

Ce chapitre a permis de montrer que la terre crue, loin d'être un simple matériau traditionnel, peut devenir un véritable levier pour une architecture durable et performante. Son inertie thermique et ses qualités hygrométriques en font un matériau bioclimatique capable de réguler naturellement la température et l'humidité, tout en limitant les besoins en chauffage et en climatisation.

Les simulations réalisées sur la maison 24h confirment que la terre crue seule ne suffit pas à garantir un confort optimal. C'est l'association de la matière avec des dispositifs passifs — isolation, protection solaire, orientation et ventilation — qui permet d'obtenir des espaces agréables à vivre tout au long de l'année. L'architecture en terre crue n'est donc pas seulement une question de matériau, mais de conception globale et intégrée.

L'analyse des techniques traditionnelles et des innovations contemporaines montre que la terre crue est capable de dialoguer avec le passé et le futur. Les savoir-faire vernaculaires, comme le pisé, la bauge ou le torchis, apportent robustesse et mémoire culturelle, tandis que les techniques hybrides, la terre projetée ou l'impression 3D offrent de nouvelles possibilités formelles et performantes. La combinaison de ces approches permet de concevoir des bâtiments à la fois durables, efficaces et respectueux des ressources locales.

Enfin, la terre crue révèle toute sa dimension humaine et sociale. Son accessibilité, sa mise en œuvre participative et son lien avec le territoire en font un outil d'inclusion et de transmission du savoir. Cependant, son développement reste freiné par des obstacles institutionnels et normatifs qui demandent une réévaluation des pratiques, de l'enseignement et de la réglementation.

Ainsi, l'avenir de la terre crue dans l'architecture durable repose sur une approche contextualisée, collaborative et innovante. Comprendre ses propriétés, l'accompagner de dispositifs passifs adaptés et valoriser les savoir-faire locaux permettent de créer des bâtiments performants, durables et en lien avec leur environnement et leurs habitants. La terre crue n'est plus seulement une matière: elle devient un outil contemporain au service de la durabilité, de l'innovation et du bien-être.



Figure 92 : Múr en pisé, Equipo de Arquitectura

INTRODUCTION	
I- ÉTAT DE L'ART	
II- TEST & ANALYSE D'UN BÂTIMENT EN TERRE CRUE	
III- VERS UNE ARCHITECTURE EN TERRE CRUE ADAPTÉE ET DURABLE	
IV- CONCLUSION	
V- BIBLIOGRAPHIE	
VI- ANNEXES	

Avant de commencer ce travail de recherche, je considérais la terre crue comme le matériau révolutionnaire de notre époque. Pour moi, c'était un matériau presque magique, capable de tout faire par lui-même : il rendait les ambiances intérieures chaleureuses et confortables, et un simple mur de terre suffisait à isoler le bâtiment. En somme, la terre crue se suffisait à elle-même. Mais lorsque j'ai commencé à me renseigner sur ce qu'elle était réellement, d'où elle provenait et comment elle fonctionnait, je me suis vite rendu compte que les choses étaient un peu plus complexes que je ne l'imaginais. C'est à ce moment-là que je me suis mise au défi de comprendre : comprendre comment, grâce à ce matériau ancestral, il était possible de revenir aux bases mêmes de la construction préhistorique tout en concevant des bâtiments performants, adaptés à notre époque.

En avançant dans mes lectures et mes échanges, je me suis surtout rendu compte que la terre crue n'était pas un matériau isolant. Elle ne retient pas la chaleur comme le ferait un isolant classique, mais elle la régule dans le temps. Sa performance ne vient pas de sa résistance thermique, mais de son inertie, cette capacité à absorber la chaleur pour la restituer lentement, stabilisant ainsi les températures intérieures. Cette découverte a bouleversé ma vision initiale : la terre crue n'est pas performante seule, elle le devient lorsqu'elle s'inscrit dans un système global de conception architecturale, en lien avec le climat et les dispositifs passifs.

Mes premières recherches se sont appuyées sur une exploration bibliographique dense. J'ai lu, relu, recoupé les mêmes informations, parfois répétées, parfois contradictoires. J'avais le sentiment de tourner en rond, d'effleurer un savoir immense sans parvenir à en saisir toute la profondeur. C'est alors que j'ai décidé d'aller plus loin. J'ai contacté CRAterre et Amàco, deux institutions de référence dans le domaine de la construction en terre. Ces échanges ont été déterminants. J'y ai rencontré des personnes passionnées, animées par l'envie de transmettre et convaincues que la terre crue n'appartient pas seulement au passé, mais qu'elle incarne au contraire une voie d'avenir pour une architecture plus respectueuse du vivant. Grâce à ces rencontres, j'ai eu accès à des ressources précieuses : des archives, des plans, des analyses thermiques, des études de matériaux, et des retours d'expériences issus de projets réels. Ces apports m'ont permis d'avoir une compréhension plus fine de la matière et de ses usages architecturaux contemporains.

Mon mémoire s'est donc construit autour d'une problématique centrale : comment la terre crue peut-elle participer à l'amélioration du confort thermique d'un bâtiment additionné à une démarche passive ? Pour y répondre, j'ai adopté une démarche progressive, articulée en trois grandes étapes : comprendre, analyser, expérimenter.

La première partie du mémoire a posé les bases de la recherche. Elle s'est attachée à redéfinir la terre crue non pas comme une simple matière première, mais comme un système constructif complexe aux multiples formes : pisé, adobe, torchis, bauge, terre allégée. Chacune de ces techniques traduit une adaptation locale à des contextes géographiques et climatiques variés. J'ai cherché à comprendre comment les propriétés physiques de la terre — sa densité, son inertie, sa perméabilité à la vapeur d'eau — influencent directement le confort thermique et hygrothermique des espaces intérieurs. Cette phase m'a permis de dépasser une vision idéalisée du matériau pour entrer dans une approche scientifique et architecturale plus rigoureuse. La terre crue, je l'ai compris, n'est pas un isolant mais un régulateur ; son efficacité repose sur sa capacité à travailler en synergie avec d'autres éléments : orientation, ventilation, masse, lumière.

La deuxième partie du mémoire a constitué le cœur de mon travail. Elle s'est concentrée sur une analyse climatique et environnementale détaillée de mon cas d'étude, situé à proximité de Grenoble. Cette région, marquée par un climat montagnard tempéré, présente une grande amplitude thermique entre le jour et la nuit, des étés chauds et parfois étouffants, et des hivers rigoureux. Ces variations en font un terrain d'étude idéal pour observer la performance réelle de la terre crue.

J'ai mené un travail méthodique d'observation et de collecte de données : températures extérieures et intérieures, hygrométrie, ensoleillement, orientation, vents. À partir de ces informations, j'ai réalisé de nombreux graphiques, comparaisons et interprétations croisées, afin d'identifier les facteurs déterminants du confort thermique dans ce contexte précis. Cette démarche m'a permis de comprendre le comportement du bâtiment à différentes échelles temporelles, du cycle journalier aux variations saisonnières. J'ai pu observer, par exemple, comment les déphasages thermiques influencent la sensation de confort, ou encore comment l'humidité relative agit sur les températures.

Cette étape d'analyse, rigoureuse et technique, a été la plus enrichissante du travail. Elle m'a permis de confronter la théorie à la réalité mesurable, de traduire des phénomènes parfois abstraits en données tangibles. En comparant différents moments de l'année et en croisant les variables climatiques, j'ai acquis une compréhension fine du rôle des matériaux et de la conception architecturale dans la régulation du confort. J'ai pu identifier les points faibles de la maison étudiée, ses zones de surchauffe, ses déperditions énergétiques, et ainsi formuler des hypothèses d'amélioration.

Pour enrichir cette approche scientifique, j'ai également mené des entretiens avec les occupants des bureaux de la Maison 24h. Ces échanges m'ont offert un regard complémentaire et indispensable sur la perception du confort au quotidien. Là où les graphiques parlent en chiffres, les occupants parlent en ressentis : trop chaud l'été, trop frais en hiver, une impression de lourdeur ou au contraire de légèreté dans l'air... Ces témoignages m'ont permis d'affiner ma compréhension du confort thermique en intégrant la dimension humaine, subjective, que les instruments de mesure ne captent pas. Ils ont aussi révélé la part d'adaptation individuelle dans la sensation de confort, un aspect souvent négligé dans les études purement techniques.

Cette combinaison entre analyse quantitative et approche qualitative m'a permis d'identifier les atouts de la terre crue, mais aussi ses limites dans ce contexte précis. J'ai constaté par exemple que la terre, si elle régule efficacement les variations de température, peine à assurer une isolation suffisante dans certaines conditions hivernales et estivales, notamment lorsque la conception globale du bâtiment ne favorise pas une bonne gestion des apports solaires.

La troisième partie a consisté à prolonger cette démarche par des simulations thermiques sur la maison, afin de tester l'efficacité de différentes stratégies passives, inspirées des résultats de l'analyse initiale. Ces simulations ont permis d'expérimenter plusieurs scénarios : modification de l'épaisseur des murs en terre, ajout d'éléments de protection solaire, réorganisation des ouvertures pour favoriser la ventilation naturelle ou encore amélioration de l'inertie intérieure. L'objectif n'était pas de proposer un projet architectural figé, mais d'évaluer comment des ajustements simples pouvaient améliorer les performances thermiques du bâtiment. Ces tests ont confirmés l'importance de la masse et de l'inertie de la terre crue dans la stabilisation des températures intérieures, mais aussi l'impact majeur de la conception globale sur le confort ressenti.

Ce travail a changé ma manière de concevoir un projet. J'ai appris à observer le climat comme un élément de projet, et non comme une contrainte. Loin de chercher à isoler le bâtiment de son environnement, il s'agit au contraire de l'y intégrer pleinement. Cette approche m'a permis de comprendre que l'architecture bioclimatique n'est pas une addition de techniques, mais une philosophie du projet : une recherche d'équilibre entre l'homme, le lieu et la matière.

Sur le plan personnel, cette recherche a été une aventure intellectuelle et humaine. Elle m'a appris la rigueur scientifique, la patience de la vérification, mais aussi la curiosité et l'ouverture. Les échanges avec CRAterre et Amàco m'ont montrés l'importance de la transmission et de la recherche collective : comprendre la terre, c'est comprendre des siècles de savoirs empiriques que l'on redécouvre aujourd'hui sous un regard scientifique. J'ai également appris à confronter mes intuitions à des données objectives : les simulations, les relevés et les analyses ont parfois contredit mes hypothèses initiales, me forçant à revoir ma compréhension du matériau et de ses limites.

Cependant, ce travail théorique a ses limites. Les simulations effectuées, bien qu'instructives, ne remplacent pas une expérimentation in situ à long terme. De même, le champ d'étude reste centré sur un cas unique, limitant la portée comparative des résultats. Il serait nécessaire, dans une recherche future, d'élargir ces analyses à plusieurs typologies de bâtiments ou de combiner la terre crue avec d'autres matériaux biosourcés, afin d'explorer de nouvelles hybridations constructives.

Malgré ces limites, cette recherche ouvre sur de nouvelles perspectives. Elle démontre que la terre crue, loin d'être une simple tendance écologique, constitue une réponse pertinente et durable aux enjeux énergétiques contemporains. En intégrant des dispositifs passifs adaptés, elle peut assurer un confort thermique stable tout en réduisant l'impact environnemental des constructions. Ces conclusions peuvent servir de base à des recherches futures sur l'adaptabilité de la terre à d'autres climats, sur la combinaison avec des sources d'énergie renouvelable, ou encore sur la mise en œuvre de solutions constructives participatives, impliquant les habitants dans le processus.

Enfin, ce mémoire m'a appris que la véritable modernité de la terre crue réside dans sa simplicité et dans sa capacité à nous reconnecter avec l'essentiel. Ce matériau n'est pas une solution miracle : c'est un rappel. Un rappel que construire, c'est d'abord comprendre, écouter, adapter. La terre nous enseigne la lenteur, la mesure et le respect du temps long. Elle nous pousse à concevoir autrement, à penser le bâti comme un organisme vivant, en dialogue constant avec son environnement.

Ainsi, si ce travail a commencé par une fascination presque naïve pour un matériau que je croyais « révolutionnaire », il se termine par une conviction beaucoup plus profonde : celle que la terre crue n'a rien de spectaculaire, mais qu'elle est essentielle. Elle incarne une manière de construire avec bon sens, sensibilité et responsabilité. À travers cette recherche, j'ai compris que l'avenir de l'architecture ne dépend pas seulement de la technologie ou de l'innovation, mais de notre capacité à réapprendre à faire avec peu, à concevoir avec humilité, et à renouer avec la matière, le climat et la terre elle-même.



Figure 93 : Mur en terre crue, Equipo de Arquitectura

INTRODUCTION	
I- ÉTAT DE L'ART	
II- TEST & ANALYSE D'UN BÂTIMENT EN TERRE CRUE	
III- VERS UNE ARCHITECTURE EN TERRE CRUE ADAPTÉE ET DURABLE	
IV- CONCLUSION	
V- BIBLIOGRAPHIE	
VI- ANNEXES	

ADEME. Bâtiment : comment rénover et construire face au dérèglement du climat ? Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique, 2023. Disponible en ligne : <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/secteurs-d-activites/batiment-particulier>, consulté le 11 septembre 2025.

APUR. Inertie des murs selon les techniques constructives à Paris. Cahier n° 240-07, APUR, 2010.

Archives de l'Université de Grenoble. Dossier Maison 24h. Grenoble, 1987.

À portée de mains (blog Géomaterio). Qu'est-ce que la terre allégée ? Blog Géomaterio, 12 décembre 2022. Disponible en ligne : <https://blog.geomaterio.fr/materiaux/quest-ce-que-la-terre-allee/>, consulté le 29 octobre 2025.

ATELIER ALP. L'inertie des murs en terre crue. Atelier ALP, consulté en ligne, 11 octobre 2025.

BOULERBAH, Taleb. L'amélioration du confort thermique de l'habitat traditionnel par l'adaptation d'un matériau de haute performance et le traitement de l'espace patio : Cas d'étude, secteur sauvegardé de la ville de Laghouat. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider - Biskra, 2019.

CHATEL OT, Pierre. La construction en terre crue : techniques modernes. Construction Durable.net, 3 décembre 2024. Disponible en ligne : <https://www.constructiondurable.net/construction-en-terre-crue/>, consulté le 2 novembre 2025.

Climat Grenoble Isère. Disponible en ligne : <https://www.meteo-grenoble.com/climat>, consulté le 10 octobre 2025.

Conférence Internationale Francophone NoMad. Nouveaux Matériaux et Durabilité, organisée par le Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement (LGCgE), France, 2015.

CRAterre. Centre international de la construction en terre. Grenoble : CRAterre, 2025. Disponible en ligne : <https://craterre.org/>, consulté le 10 octobre 2025.

CRAterre. Traité de construction en terre. Éditions Parenthèses, Marseille, 2009

CSTB. Inertie thermique et confort d'été. Guide technique, 2016.

Data.gouv.fr. Ecolos_consumption. Entrepôt de données scientifiques, 2025. Disponible en ligne : https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/Ecolos_consumption, consulté le 11 juin 2025.

DE CHAZELLES, Claire-Anne & KLEIN, Alain (dir.). Échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue. Volume 1 : Terre modelée, découpée ou coffrée, Matériaux et modes de mise en œuvre. Paris : Éditions de l'Espérou, 2012.

DETHIER, Jean (dir.). Habiter la terre : L'art de bâtir en terre crue, traditions, modernité et avenir. Éditions Flammarion, Paris, 2020.

DISCH, Rolf. The Heliotrope. Disponible en ligne : <https://rolfdisch.de/en/projects/das-heliotrop-2/>, consulté le 9 décembre 2024.

F. El Fgaier, S. Dubois, M. Gomina & H. Cagnon. Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials, : A Literature Review. Sustainability, vol. 11, n° 19, 2019, p. 5342. Disponible en ligne : <https://doi.org/10.3390/su11195342>.

FATHY, Hassan. Architecture for the Poor : An Experiment in Rural Egypt. University of Chicago Press, Chicago, 1976.

FAUCOMPRÉ, Pascal. Construction 3D en terre crue : technologie low-tech du futur ? Build Green – France, 2025. Disponible en ligne : <https://www.build-green.fr/construction-3d-en-terre-crue-technologie-low-tech-du-futur/>, consulté le 16 octobre 2025.

FONTAINE, Laetitia & ANGER, Romain. Bâtir en terre : Du grain de sable à l'architecture. Éditions Belin, Paris, 2009.

GAUZIN-MÜLLER, Dominique. Architecture écologique. Éditions Le Moniteur, Paris, 2001.

GIUFFRIDA, Giada ; IBOS, Laurent ; BOUDENNE, Abderrahim & ALLAM, Hamza. Comportement thermique de murs en blocs de terre comprimée : comparaison entre simulations et mesures à l'échelle paroi. In : 32^e Congrès Français de Thermique, Strasbourg, France, juin 2024.

GROBE, Carsten. Construire une maison passive : Conception, physique de la construction, détails de construction, rentabilité. Éditions L'Inédite, Paris, 2008.

GUILLAUD, Hubert. Construire en terre : Du grain de sable à l'architecture. Éditions Belin, Paris, 2009.

HARLOT-VALDIEU, Catherine & OUTREQUIN, Philippe. Bâtiments passifs tertiaires. Éditions Le Moniteur, 2017.

HAUGLUSTAINE, Jean-Marie & SIMON, Francy. L'isolation thermique des murs. 2^e édition, Éditions Eyrolles, Paris, 2018.

JOFFROY, Thierry. Les architectures de terre crue : des origines à nos jours. In : JACQUET,

KARAWITZ Architecture (dir.). La Maison bambou – Bessancourt (95). Disponible en ligne : <https://lamaisondupassif.fr/la-maison-bambou-bessancourt-95-karawitz/>, consulté le 9 décembre 2024.

KIKI, Marius ; LABOREL-PRÉNERON, Anne ; AUBERT, Jean-Emmanuel & MAGNIONT, Camille. Thermal and hygric properties of unfired earth bricks: A key material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, vol. 374, 2023.

LAVOYE, Frédéric ; BOEUF, Frédéric & THELLIER, Françoise. Qualité des ambiances dans les bâtiments : Le confort thermique de l'habitant. Presses des Mines, Paris, 2015.

LE MONITEUR. À la conquête d'un pôle culturel. *Le Moniteur*, n° 5959, 19 janvier 2018.

LÉAL, Émilie ; DE CHAZELLES, Claire-Anne & DEVILLERS, Philippe (dir.). Échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue. Volume 5 : Architecture et construction en terre crue – Approches historiques, sociologiques et économiques. Éditions de l'Espérou, 2022.

Les déclinaisons du mur Trombe. *Cahiers Techniques du Bâtiment*, 7 octobre 2025. Disponible en ligne : <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/les-declinaisons-du-mur-trombe.34897>, consulté le 7 octobre 2025.

MACK, Gerhard. Seven Buildings 1983–2014 – Ricola. 2014.

Météo France. Fiche climatologique : Statistiques 1991–2020 et records Grenoble – LVD (38). Disponible en ligne : https://donneespubliques.meteofrance.fr/FichesClim/FICHECLIM_38538002.pdf, consulté le 3 octobre 2025.

PAQUET, Élodie. Construire l'avenir avec le passé : l'impression 3D en terre crue, une solution décarbonée pour l'habitat de demain. *EchoSciences – Pays de la Loire*, 12 mai 2025. Disponible en ligne : <https://www.echosciences-paysdelaloire.fr/articles/construire-l-avenir-avec-le-passe-l-impression-3d-en-terre-crue-une-solution-decarbonee-pour-l-habitat-de-demain>, consulté le 26 octobre 2025.

RANGEARD, Damien ; PERROT, Arnaud & COURTEILLE, Eric. Impression 3D de terre crue. *DiXite3dPrint : Fabrication additive pour la construction. Quelle actualité nationale ?* École des Ponts ParisTech, janvier 2019.

RÉSEAU ÉCOBÂTIR (et FFB ; SCOP BTP, ENTPE). Règles professionnelles — Enduits sur supports composés de terre crue. Paris : Éditions Le Moniteur, 2013.

RÖHLEN, Ulrich & ZIEGERT, Christof. Construire en terre crue : Construction – Rénovation – Finitions. Éditions du Moniteur, Paris, 2013.

Serri et al. Journal of Building Engineering, 2020.

TCHANG, Nathalie. L'essentiel de la RE2020. Éditions Le Moniteur, Paris, 2021.

Université Grenoble Alpes. LA MAISON EN TERRE – Maison des 24 heures. Vidéo YouTube, 26 septembre 2025. Disponible en ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=yVyYtRZQQ84>, consultée le 4 septembre 2025.

VERITAS. Éléments de conception des bâtiments : exigences réglementaires et normatives. Éditions Le Moniteur, 2016.

VU, Brigitte. Le guide de l'habitat passif. Éditions Eyrolles, 2008.

Walker et al. Earth Building Materials, 2019.

ZONGO, Zoulbi Léon. L'amélioration des processus d'évaluation des impacts environnementaux des matériaux locaux (terre crue) : vers une prise en compte efficace du développement durable au Burkina Faso. Journal of Business and Technologies, 2025.



Figure 94 : Mur en pisé

INTRODUCTION	
I- ÉTAT DE L'ART	
II- TEST & ANALYSE D'UN BÂTIMENT EN TERRE CRUE	
III- VERS UNE ARCHITECTURE EN TERRE CRUE ADAPTÉE ET DURABLE	
IV- CONCLUSION	
V- BIBLIOGRAPHIE	
VI- ANNEXES	

ENTRETIENS

Déroulé des entretiens :

Discussion ouverte avec quelques questions principales en entretien

Quel est votre ressenti lors de votre usage quotidien du bâtiment, notamment sur l'ambiance générale à l'intérieur, le bruit et le silence, les périodes de chaleur et de froid. Qu'est-ce que cela signifie pour vous de travailler dans un bâtiment en terre et comment vous percevez ce type d'environnement comparé à d'autres bâtiments.

Entretien 1 : Nadège Masnada

Voici l'expérience de travail de Nadège Masnada, dans la maison en terre sur le campus de St Martin d'Hères.

Je travaille de manière régulière tous les lundis. Et de manière irrégulière, je passe parfois un autre jour de la semaine si j'ai un rendez-vous sur le campus. Le reste du temps, je travaille dans un autre bureau à Grenoble (bâtiment de bureaux très traditionnel et refait à neuf il y a 3 ou 4 ans).

Ce que j'aime dans ce bâtiment, c'est son originalité. Quand je dis que je travaille à la maison en terre, tout le monde connaît et repère bien ce bâtiment très spécial. J'aime bien aussi raconter son histoire, ça fait une vraie différence avec un bureau classique sur lequel on n'a rien à dire ! Parfois c'est quand même pénible que les gens soient curieux du lieu et veuillent juste le visiter, alors que nous sommes en plein travail !

C'est intéressant d'avoir des études menées dans ce bâtiment par des étudiants, Même si parfois c'est un peu perturbant (passages qui laissent des traces, organisation pour les visites...)

Quand j'y travaille, j'aime l'aspect visuel de la pierre à l'intérieur, les courbes, les voûtes du plafond... Le défaut par contre, c'est le mouvement du son. Il est amplifié par endroit, on a l'impression qu'il y a une amplification. Et selon où on se place, ça peut être gênant de discuter avec quelqu'un.

J'aime qu'il y ait des fenêtres et des portes partout. Néanmoins, le bâtiment n'est pas si lumineux que ça. Personnellement, j'allume beaucoup les lampes car j'ai besoin d'être éclairée pour travailler.

Toutes ces ouvertures, me semble-t-il, nous apporte le froid en hiver et le chaud en été.

Toutes les portes créent également une incertitude d'entrée pour les agents qui viennent nous voir. La première fois, ils ne savent jamais par quelle porte rentrer.

J'aime aussi être de plain pied, pouvoir sortir directement à l'extérieur. Deux portes donnent sur le parking et la rue, Mais les deux autres sur un terrain de pelouse et d'arbres, c'est très agréable. Il faut faire avec les petits lézards qui rentrent se mettre à l'abri et qui nous surprennent souvent!

L'aménagement du lieu est bien pensé, Nous avons privilégié les meubles bas, et pour les étagères, des rayonnages sans fond et sans portes pour éviter d'alourdir ou de réduire la vision. Je ne suis pas sûre que notre bâtiment soit accessible PMR, les ouvertures me semblent étroites.

La pièce «sanitaires» est le lieu de stockage de pas mal de branchements électriques, Il y a un bruit constant qui peut être gênant s'il n'y a pas d'autres bruits autour.

Quand nous sommes au complet (4 bureaux, et parfois une personne en plus de passage qui travaille un moment), ça commence à faire beaucoup. Je pense que 3 personnes qui travaillent dans ce lieu en même temps, c'est bien. Au delà, il faut faire vraiment attention au reste de l'équipe (déplacements dans le lieu, volume de nos voix...)

D'une manière générale, j'aime bien travailler dans ce lieu au printemps et à l'automne, quand il fait beau mais pas trop chaud, J'aime moins quand (comme aujourd'hui), il fait gris, sombre, qu'il pleut...

J'aime bien aussi qu'il n'y ait que notre équipe dans ce lieu, On ne partage pas avec un autre service, on n'a pas besoin de composer avec des personnes qui pourraient nous déranger.

Entretien 2 : Marie Besson

Il est très agréable de travailler dans une maison en terre, l'ambiance est très saine, c'est très cocoon

Le bruit et le silence, a certains endroits c'est très étrange au niveau des voûtes il y a comme un écho de voix . Mais sinon rien de particulier

Concernant les périodes de chaleur et de froid l'isolation n'est pas bonne du tout , il fait froid et très chaud l'été . Les murs de la maison en pierre sont chaud lorsqu'on les touche . Du coup les radiateurs ont dû être changés pour que l'on puisse être bien l'hiver et une clim portable a dû être achetée aussi car la chaleur était insoutenable .

Je perçois de travailler dans une maison en terre comme un grand privilège , c'est vraiment très agréable . J'ai la sensation de part sa beauté et son originalité d'être à la fois dans un hammam, ou une ruche , ou un nid d'oiseau. Je me sens privilégiée d'avoir un bureau dans une maison en terre .

Entretien 3 :Mme Elif BAGDAD

Il fait bon de travailler dans ce lieu, il y a une ambiance chaleureuse, une impression de cocon. C'est une maison qui est mal isolée aussi bien avec l'extérieure qu'à l'intérieure. Il y a des endroits dans la maison où le son résonne beaucoup.

L'été il fait très chaud, on peut monter à 43°, l'hiver il fait froid si on ne met pas les radiateurs en marche.

Je m'estime chanceuse de pouvoir travailler dans cet environnement, original. Je préfère travailler dans ce lieu que dans les gros bâtiments.

ARCHIVES

LA MAISON 24H

Bâtiment Maison en terre

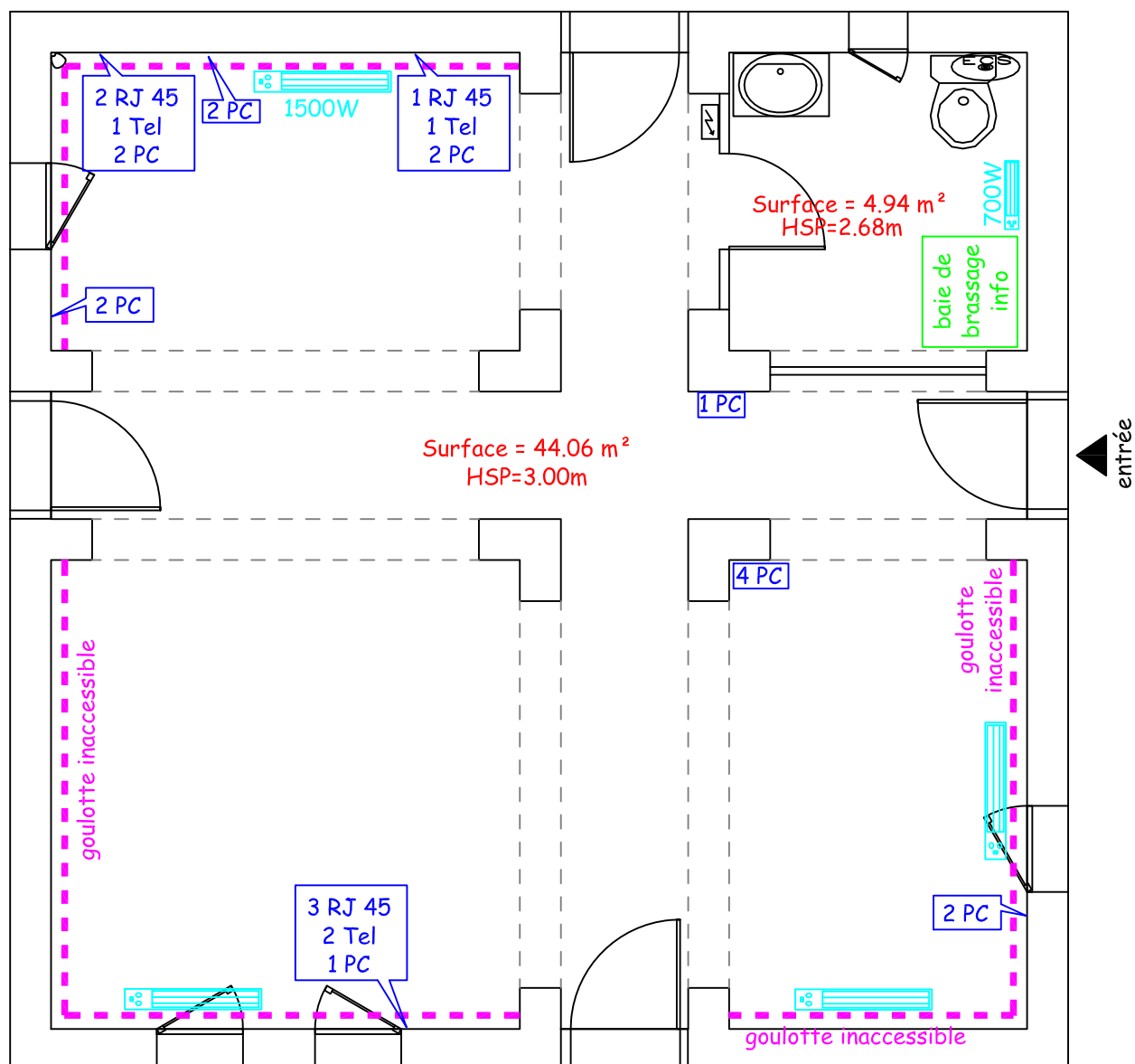


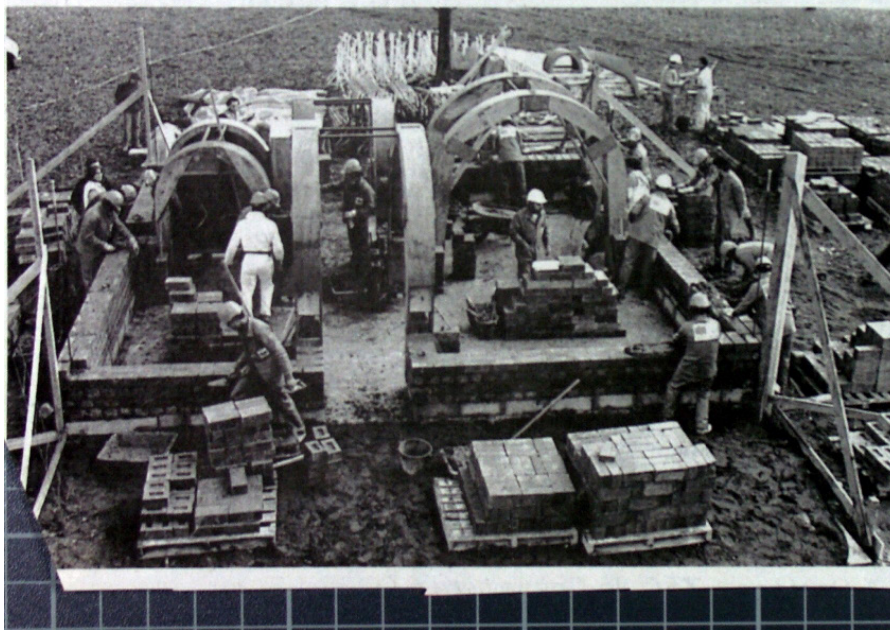
Figure 95 : Plan de la maison 24h actuellement

CAMPUS

LUNDI 24 NOVEMBRE 1986

Une terre dont on fait les maisons

Quand universitaires, architectes et bâtisseurs se préoccupent des sans-abris



Grenoble, pays de tradition de la brique de terre cuite, vient de lancer l'opération « Grenoble en terre, capitale de la terre » avec une construction en terre précisément, qui s'étend sur le terrain de l'université scientifique, technologique et médicale (U.S.T.M.G.). Cette construction établit aussi une manière de prélude à « l'année internationale des sans-abris » décrétée par les Nations unies pour 1987. Défi technologique mondial, puisqu'elle a été montée en 24 heures, elle témoigne encore de la part du maître d'ouvrage, l'U.S.T.M.G., d'une contribution originale entre des partenaires très divers.

24 heures (3 fois huit heures) il n'en a pas fallu plus aux stagiaires de l'Association pour la formation professionnelle des adultes (A.F.P.A.) pour réaliser le gros œuvre d'un prototype de logement économique en terre crue, un défi qui constitue une première technologique mondiale dans le domaine de la construction en terre.

Technologie moderne

Défi symbolique puisqu'il se situe au seuil de « l'année internationale des sans abris » induisant le constat selon lequel il faudra à l'avenir compter avec la terre pour définir une stratégie d'habitat. Savez-vous qu'il faudrait aujourd'hui loger convenablement près de 1 milliard de sans abri et que ce chiffre correspond à la nécessaire production, d'ici à l'an 2000, de près de 2 millions de logements ?

Difficile de trouver matériau de base plus rentable. Mais encore faut-il être persuadé que la construction en terre représente une technologie résolument moderne et performante, même si on l'a perdue de vue, même si on a oublié les savoir-faire, même si on a priori sans réel fondement l'assimile à une technologie pauvre. C'est en tous cas le défi au plan de la conception que lance l'école d'architecture de Grenoble (E.A.G.), associée au projet.

Fiabilité

Bien sûr, il n'est guère envisageable de construire des immeubles de plus de deux étages avec cette technologie, mais ce n'est pas non plus le

but recherché. En tout état de cause, la fiabilité technique et économique n'est plus à démontrer. Et il s'agit bien de lever des barrières psychologiques élevées sur des considérations lourdes de conséquences pour l'avenir du logement des sans abris. Que Grenoble, « ville du futur » s'érige en « capitale de la terre » et se jumelle pour l'occasion avec la ville de Kigali (capitale du Rwanda) qui développe un projet similaire jette une nouvelle lueur symbolique sur cette opération.

Partenariat

Mais elle prend aussi tout son sens dans la collaboration qu'elle suscite entre les différents partenaires. La maîtrise d'ouvrage est assurée par l'USTMG mais également par l'institut de recherche interdisciplinaire en géologie et mécanique (I.R.I.G.M.), l'institut universitaire de technologie 1, l'institut Dolomieu de géologie-minéralogie, l'institut des sciences et techniques de Grenoble, section géotechnique.

La conception architecturale et la maîtrise d'œuvre réunit l'E.A.G. et le centre de recherche et d'application Terre (CRATerre).

Enfin le financement est partagé entre l'USTMG, l'EAG et CRATerre.

Un partenariat qui pose la première brique d'une collaboration qui se concrétisera encore par la signature d'une convention de recherche et de formation entre l'université, l'EAG et CRATerre ainsi que l'a annoncé Maurice Tanche, président de l'USTMG.

Michel BELLATON

Figure 96 : Extrait du journal, Campus, 24 novembre 1986

LE RETOUR A LA TERRE

une maison en 24 heures !



Au matin du 3^e jour, achèvement des coupoles.

En prélude à l'Année Mondiale du logement et des sans-abris (décret des Nations-Unies pour 1987), une expérience sans précédent s'est déroulée fin 86, simultanément en France (Grenoble) et au Rwanda : la construction d'une maison en terre crue directement prélevée sur place, et ceci, en 24 heures. Opération à but scientifique, politique et économique qui démontre que la terre crue est un matériau clef, dont l'utilisation dans des conditions bien déterminées, pourrait alléger les coûts de construction, apportant ainsi des solutions nouvelles aux problèmes de l'habitat, dans des environnements aussi différents que l'Europe ou l'Afrique. On voit l'intérêt de cette recherche, en particulier ce qu'elle apporterait aux pays du Tiers-Monde. On ne travaille pas la terre crue de la même manière en pleine brousse ou sur sol d'un

département français : d'où une concertation menée en 86 pour garantir la fiabilité d'une telle entreprise, et poser les bases d'un réel avenir pour ce type de construction. Performances technique et économique, l'élaboration, la conception et la construction de la maison ont été rendues possibles par les interventions concertées de quatre partenaires, dans le cadre d'une action menée par Terre d'Avenir. L'Institut Dolomieu de Géologie-Minéralogie de l'Université Scientifique Technologique et Médicale de Grenoble s'est penché sur le problème de la maîtrise de la matière : choix d'une bonne terre dont les caractéristiques minéralogiques et chimiques offrent la meilleure garantie d'exploitation. L'Institut de Recherches Interdisciplinaires en Géologie et Mécanique a étudié la façon d'utiliser cette terre (exploitation



ARCHITECTURE

Pari gagné à Grenoble : Un maison en terre construite en 24 heures

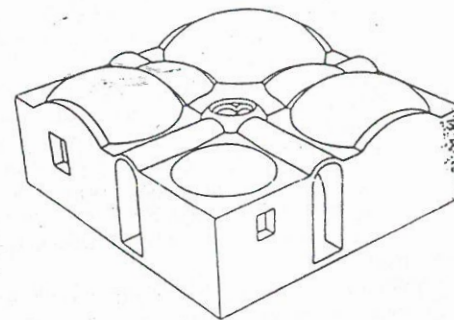
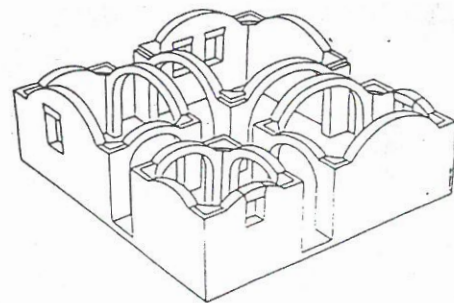
Une belle prouesse vient d'être réalisée en un temps record par les stagiaires de l'A.F.P.A. de Saint-Priest sur le campus universitaire de Grenoble. Sous une pluie ininterrompue, le logement économique en terre crue, commandité par l'Université des Sciences l'équipe CRATerre, a bien été achevé en "24 heures" (3 x 8 heures), entre le 19 et le 21 novembre. En elle-même, cette opération résume l'ensemble des objectifs que se fixent ses promoteurs en matière de "construction à bon marché".

En premier lieu, cet habitat en briques crues répond à un cahier des charges rigoureux, établi par l'Institut-Dolomieu de Géologie-Minéralogie et le Département de Génie Civil de l'I.U.T.1. En second lieu, la réalisation et la mise en œuvre des formes architecturales les plus performantes respectent les règles de conception et de construction élaborées par CRATerre au cours de sept années d'expérimentation.

Sur un registre complémentaire, le projet permet de concrétiser la volonté de former une main d'œuvre technique, apte à prendre en charge d'importants projets de coopération avec les pays en voie de développement. Cette opérations symbolique illustre les potentialités de collaboration en matière de recherche appliquée entre l'U.S.T.M.G. et l'Ecole d'Architecture, collaboration qui s'officialisera dans les semaines à venir par la signature d'une convention.

Avec cette expérimentation "in situ", CRATerre entend desserrer l'étau de scepticisme qui entoure encore ce processus de construction et "dégeler" les partenaires financiers et industriels éventuels. Alors que les grands chantiers à l'exportation se multiplient et attisent les convoitises des concurrents (les Japonais surtout), CRATerre ne devrait pas manquer d'appuis grenoblois et isérois pour entamer cette entrée sur le marché mondial... L'appel est du moins lancé

le Grand projet de l'année 1987 - "*Grenoble-Capitale de la terre*" - répond à cette nécessité de rassembler en un unique sommet professionnel et politique l'ensemble des partenaires concernés par le montage d'une "filiale de production". Si l'urgence commande à l'équipe CRATerre de ne pas se faire déposséder du marché extérieur, ses partenaires doivent également anticiper sur un second créneau, la restauration du parc immobilier traditionnel. Le seul patrimoine ancien dauphinois mériterait une attention soutenue des administrations et des entreprises du bâtiment spécialisées dans la restauration. Un exemple seulement : le village de Delomieu est à 90 % construit en pisé. Des procédés courants utilisés dans la région (carreaux de terre, pisé, adobe, torchis,...) aux expérimentations de l'Isle d'Abeau (blocs de terre vibro-compactés, terre-paille, pisé non stabilisé...), les références ne manquent pas aux maçons.



Le bâtiment à coupoles du campus est destiné à survivre. Son style attachant le fera rapidement adopter par les Grenoblois. D'ailleurs, n'illustre-t-il pas l'inévitable rencontre entre la technologie occidentale et la culture africaine ?

Yves MORIN.

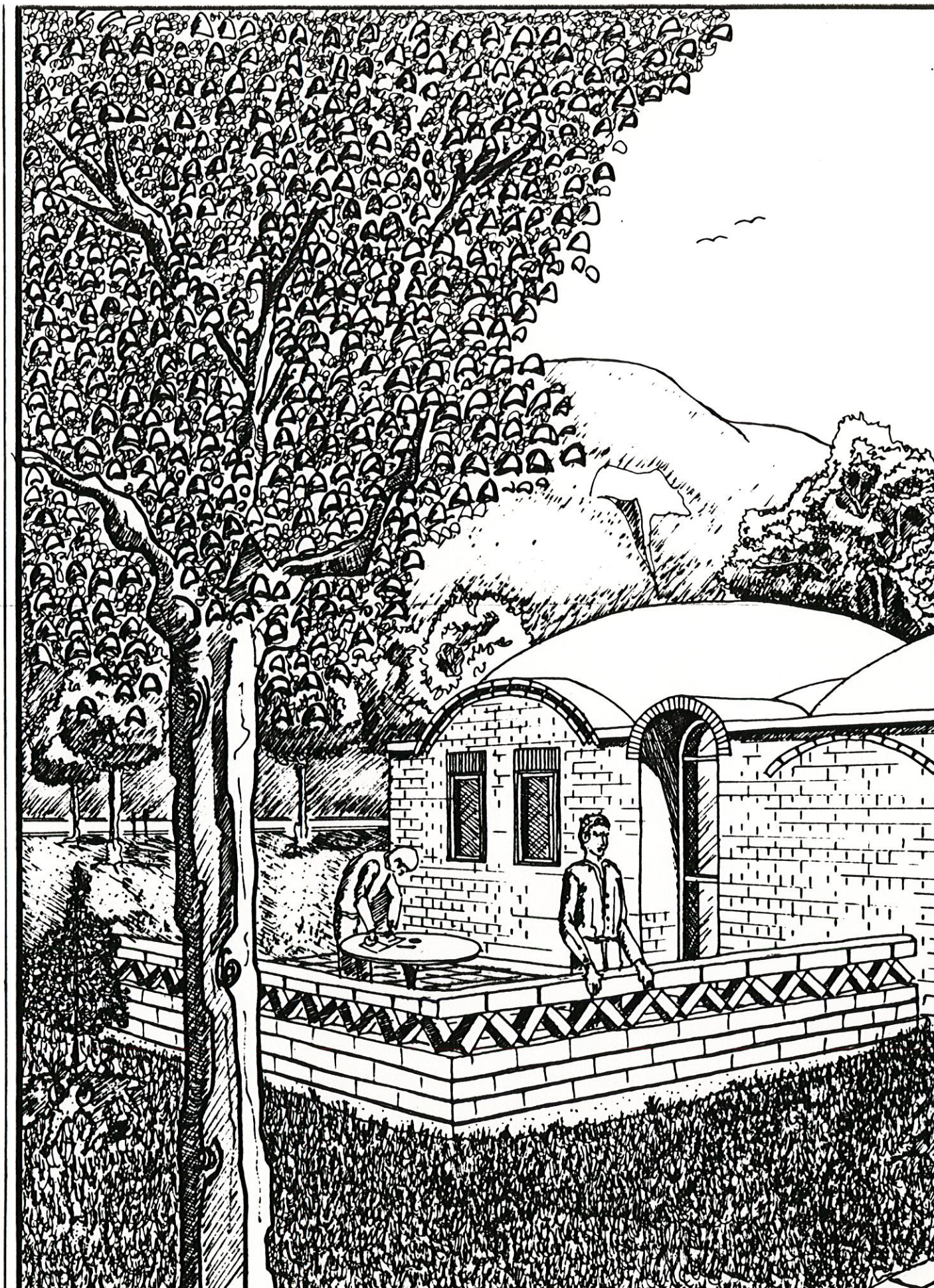
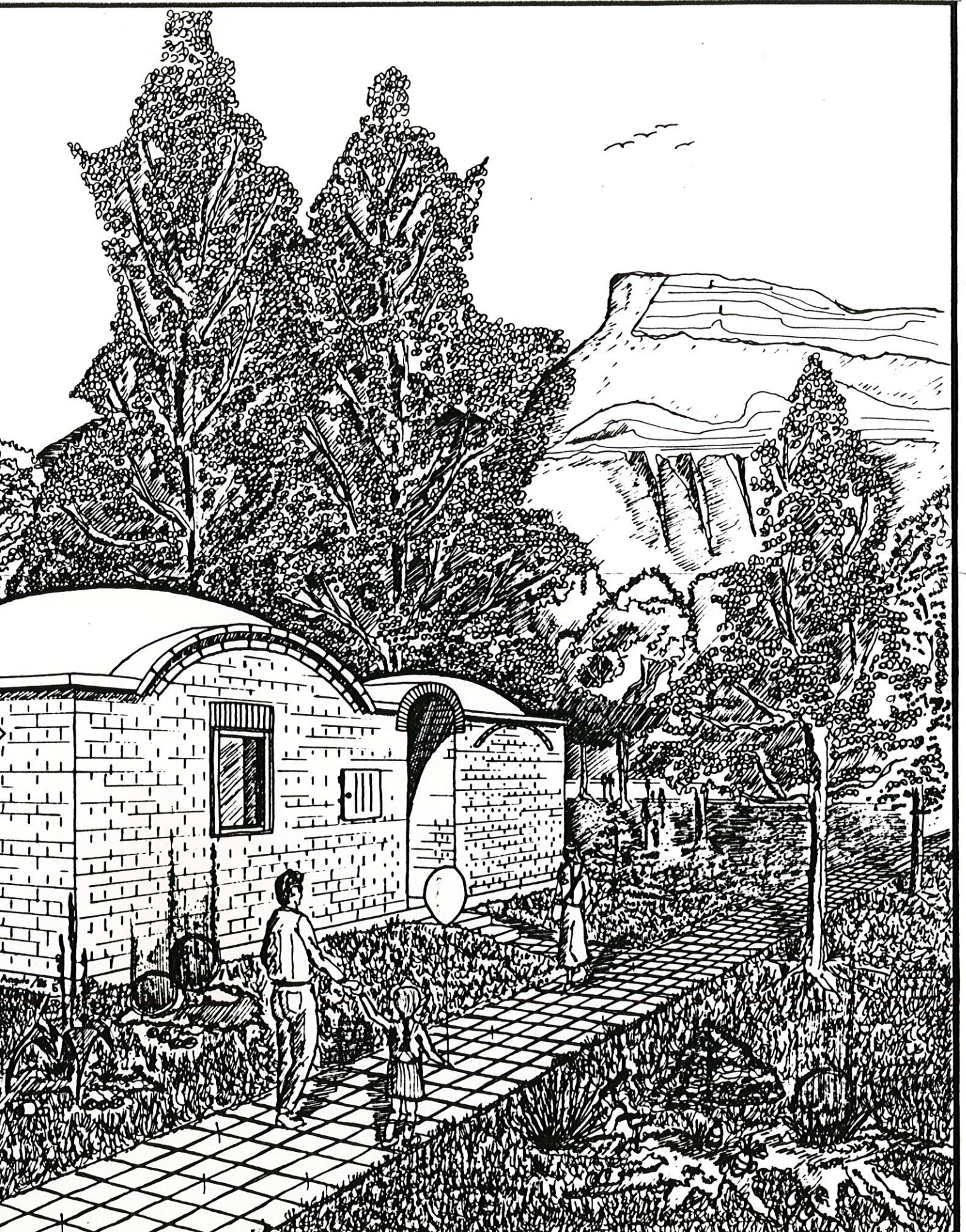


Figure 99 : Extrait du dossier de construction de la maison 24h



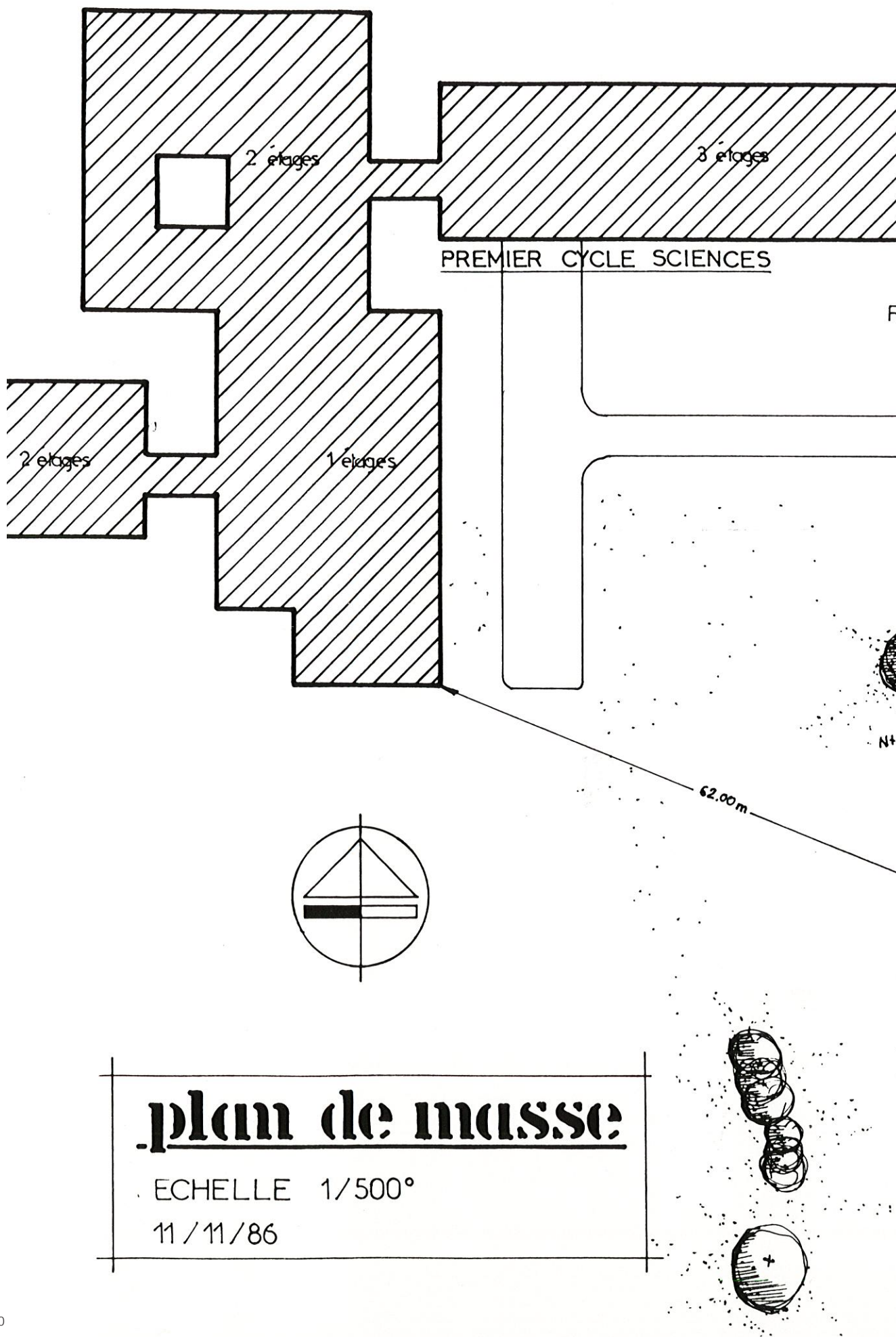
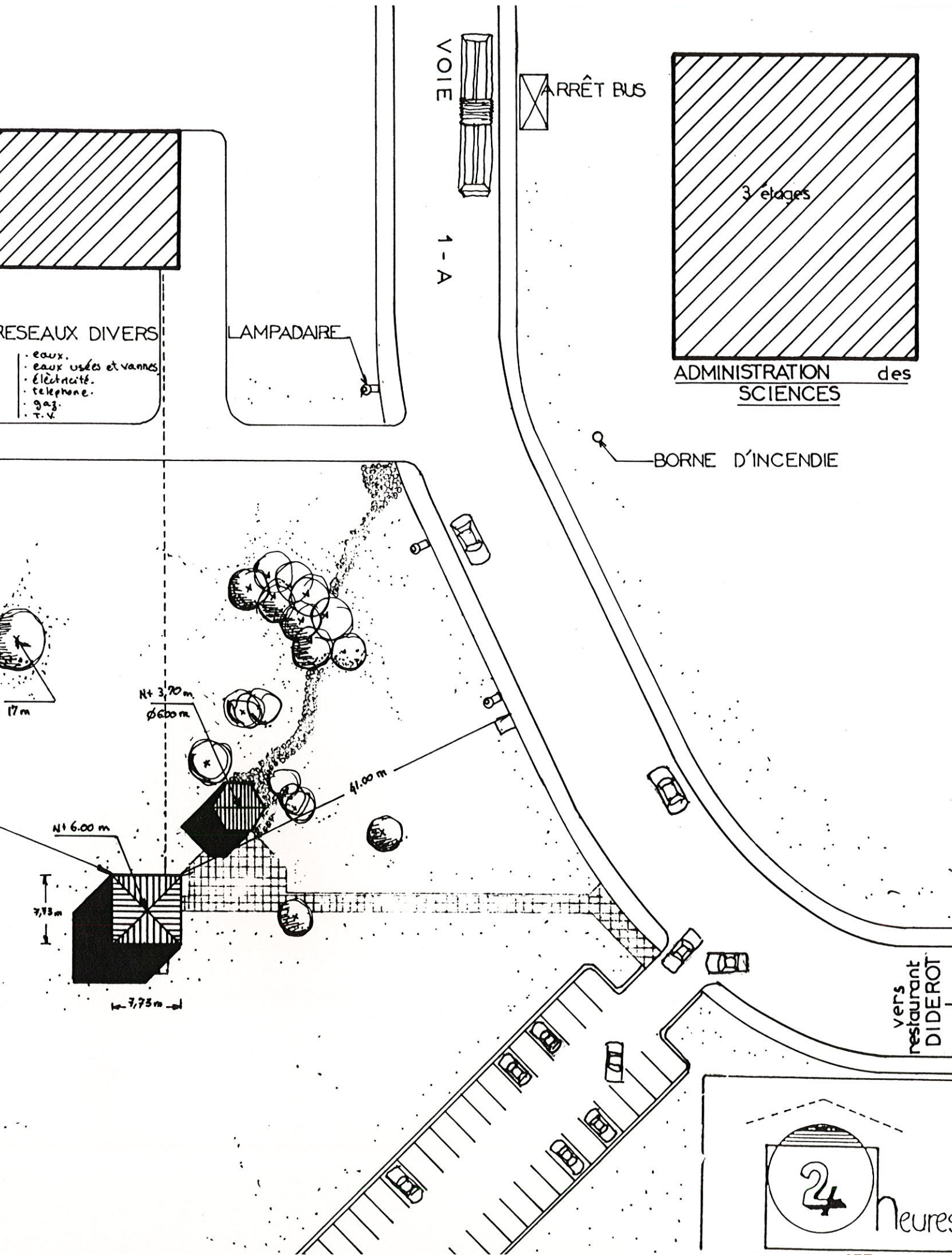


Figure 100



EXEMPLE DES JEUX DE DONNÉES

time	datetime	value	time_diff	value_outlier	time_diff_outlier	interruption	long_interruption
1,5424E+12	2018-11-16 16:08:06.275	41		False	False	False	False
1,5424E+12	2018-11-16 16:08:08.042	41	0 days 00:00:01.767000	False	False	False	False
1,5424E+12	2018-11-16 16:11:15.747	41	0 days 00:03:07.705000	False	False	False	False
1,5424E+12	2018-11-16 16:13:33.838	41	0 days 00:02:18.091000	False	True	False	False
1,5424E+12	2018-11-16 16:15:02.219	41	0 days 00:01:28.381000	False	True	False	False
1,5424E+12	2018-11-16 16:16:14.938	41	0 days 00:01:12.719000	False	True	False	False
1,5424E+12	2018-11-16 16:21:14.364	41	0 days 00:04:59.426000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:00:52.708	34	3 days 01:39:38.344000	False	True	True	True
1,5427E+12	2018-11-19 18:01:04.888	34	0 days 00:00:12.180000	False	True	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:05:53.164	34	0 days 00:04:48.276000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:10:54.114	34	0 days 00:05:00.950000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:15:52.478	34	0 days 00:04:58.364000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:20:52.656	34	0 days 00:05:00.178000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:25:53.559	34	0 days 00:05:00.903000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:30:53.061	34	0 days 00:04:59.502000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:35:53.200	33	0 days 00:05:00.139000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:40:53.012	33	0 days 00:04:59.812000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:45:52.613	33	0 days 00:04:59.601000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:50:52.730	33	0 days 00:05:00.117000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 18:55:52.850	33	0 days 00:05:00.120000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 19:00:53.012	33	0 days 00:05:00.162000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 19:05:53.599	33	0 days 00:05:00.587000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 19:10:52.292	33	0 days 00:04:58.693000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 19:15:52.531	33	0 days 00:05:00.239000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 19:20:53.037	33	0 days 00:05:00.506000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 19:25:54.057	33	0 days 00:05:01.020000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 19:30:52.037	33	0 days 00:04:57.980000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 19:35:52.458	33	0 days 00:05:00.421000	False	False	False	False
1,5427E+12	2018-11-19 19:40:53.358	33	0 days 00:05:00.900000	False	False	False	False

Tableau de l'humidité extérieure

time	datetime	value	time_diff	value_outlier	time_diff_outlier	interruption	long_interruption
1,54334E+12	2018-11-27 18:11:04.843	4,9	0 days 00:01:00.016000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:12:04.854	4,8	0 days 00:01:00.011000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:14:04.892	4,7	0 days 00:01:00.018000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:15:04.915	4,5	0 days 00:01:00.023000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:16:04.954	4,6	0 days 00:01:00.039000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:17:04.946	4,4	0 days 00:00:59.992000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:18:04.959	4,4	0 days 00:01:00.013000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:19:04.976	4,5	0 days 00:01:00.017000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:20:05.008	4,5	0 days 00:01:00.032000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:21:05.013	4,5	0 days 00:01:00.005000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:22:05.030	4,5	0 days 00:01:00.017000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:23:05.056	4,6	0 days 00:01:00.026000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:24:05.070	4,5	0 days 00:01:00.014000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:25:05.086	4,2	0 days 00:01:00.016000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:26:05.110	4,2	0 days 00:01:00.024000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:27:05.126	4,2	0 days 00:01:00.016000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:28:05.143	4,4	0 days 00:01:00.017000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:29:05.160	4,2	0 days 00:01:00.017000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:30:05.181	4,2	0 days 00:01:00.021000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:31:05.200	4,2	0 days 00:01:00.019000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:32:05.224	4,2	0 days 00:01:00.024000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:33:05.252	4,1	0 days 00:01:00.028000	False	True	False	False
1,54334E+12	2018-11-27 18:34:05.265	4,1	0 days 00:01:00.013000	False	True	False	False

Tableau des températures extérieures

time	datetime	value	time_diff	value_outlier	time_diff_outlier	interruption	long_interruption
1,56314E+12	2019-07-14 20:25:00.169	0	0 days 00:05:00.119000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 20:30:00.055	0	0 days 00:04:59.886000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 20:35:00.049	0	0 days 00:04:59.994000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 20:40:00.064	0	0 days 00:05:00.015000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 20:45:00.057	0	0 days 00:04:59.993000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 20:50:00.129	0	0 days 00:05:00.072000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 20:55:00.056	0	0 days 00:04:59.927000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:00:00.056	0	0 days 00:05:00	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:05:00.068	0	0 days 00:05:00.012000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:10:00.060	0	0 days 00:04:59.992000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:15:00.058	0	0 days 00:04:59.998000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:20:00.119	0	0 days 00:05:00.061000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:25:00.064	0	0 days 00:04:59.945000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:30:00.091	0	0 days 00:05:00.027000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:35:00.059	0	0 days 00:04:59.968000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:40:00.052	0	0 days 00:04:59.993000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:45:00.114	0	0 days 00:05:00.062000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:50:00.054	0	0 days 00:04:59.940000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 21:55:00.100	0	0 days 00:05:00.046000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 22:00:00.071	0	0 days 00:04:59.971000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 22:05:00.054	0	0 days 00:04:59.983000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 22:10:00.086	0	0 days 00:05:00.032000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 22:15:00.061	0	0 days 00:04:59.975000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 22:20:00.073	0	0 days 00:05:00.012000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 22:25:00.059	0	0 days 00:04:59.986000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 22:30:00.065	0	0 days 00:05:00.006000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 22:35:00.118	0	0 days 00:05:00.053000	False	False	False	False
1,56314E+12	2019-07-14 22:40:00.049	0	0 days 00:04:59.931000	False	False	False	False

Tableau de consommation énergétique lié à la ventilation

time	datetime	value	time_diff	value_outlier	time_diff_outlier	interruption	long_interruption
1,5423E+12	2018-11-15 15:07:17.857	58901		False	False	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:08:23.710	58930	0 days 00:01:05.853000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:10:10.521	58980	0 days 00:01:46.811000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:10:33.245	58989	0 days 00:00:22.724000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:12:25.039	59039	0 days 00:01:51.794000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:14:14.641	59089	0 days 00:01:49.602000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:14:33.089	59097	0 days 00:00:18.448000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:16:19.255	59147	0 days 00:01:46.166000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:16:33.005	59156	0 days 00:00:13.750000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:18:26.339	59206	0 days 00:01:53.334000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:20:09.242	59256	0 days 00:01:42.903000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:20:32.847	59265	0 days 00:00:23.605000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:22:16.188	59315	0 days 00:01:43.341000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:22:32.766	59323	0 days 00:00:16.578000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:24:21.827	59373	0 days 00:01:49.061000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:24:32.690	59381	0 days 00:00:10.863000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:26:03.404	59431	0 days 00:01:30.714000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:26:32.609	59456	0 days 00:00:29.205000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:27:52.174	59506	0 days 00:01:19.565000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:28:32.534	59531	0 days 00:00:40.360000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:29:43.662	59581	0 days 00:01:11.128000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:30:32.456	59612	0 days 00:00:48.794000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:31:52.104	59662	0 days 00:01:19.648000	False	True	False	False
1,5423E+12	2018-11-15 15:32:32.377	59693	0 days 00:00:40.273000	False	True	False	False

Tableau de consommation énergétique lié au chauffage

INDEX ICONOGRAPHIQUE

Figure 1 : Terre crue compactée, ClayWorks

Figure 2 : habitat avec patio style ksurien, Redessiné par l'auteur

Figure 3 : Illustration de la mise en œuvre du Torchis, Dessiné par l'auteur

Figure 4 : Illustration de la mise en œuvre de la Bauge, Dessiné par l'auteur

Figure 5 : Illustration de la mise en œuvre de l'Adobe, Dessiné par l'auteur

Figure 6 : Illustration de la mise en œuvre du Pisé, Dessiné par l'auteur

Figure 7 : Illustration de la mise en œuvre des Briques de terre crue, Dessiné par l'auteur

Figure 8 : Illustration de la mise en œuvre de la Terre Paille, Dessiné par l'auteur

Figure 9 : Illustration de la mise en œuvre du Façonnage, Dessiné par l'auteur

Figure 10 : Répartition du patrimoine architectural en terre crue en France, Source : Craterre, Redessiné par l'auteur

Figure 11 : Répartition du patrimoine architectural en terre crue dans le monde, Source : Craterre, Redessiné par l'auteur

Figure 12 : Impression de Çatal Höyük

Figure 13 : Ziggurat de Ur, Nassiriyah, Irak, Photographe : Hasan

Figure 14 : Aït Ben Haddou, Morocco, Photographe : Raúl Mermans

Figure 15 : Yazd, Iran, Photographe : Parastoo Maleki

Figure 16 : Maison en pisé, Photographe : Patrice DOAT

Figure 17 : New Gourni, Photographe : UNESCO

Figure 18 : Maison des plantes de Ricola, Photographe : Iwan Baan

Figure 19 : Wa Shan Guest House, Chine, Photographe : Iwan Baan

Figure 20 : Coupe Schématique de l'héliotrope, Redessiné par l'auteur

Figure 21 : Coupe détails de la maison bambou, Redessiné par l’auteur

Figure 22 : Maison de Martin RAUCH, Autriche, Photographe : Beat Bühler

Figure 23 : Plan de la Maison de Martin RAUCH, Autriche, Redessiné par l’auteur

Figure 24 : Maison de Martin RAUCH & la montagne autrichienne, Photographe : Beat Bühler

Figure 25 : Plan du Pôle Aria de Philippe Madec, Cornebarrieu

Figure 26 : Pôle Aria de Philippe Madec, Photographe : Pierre Yves BRUNAUD

Figure 27 : Détails du Pôle Aria de Philippe Madec, Photographe : Pierre Yves BRUNAUD

Figure 28 : Maison de Martin RAUCH & la montagne, Photographe : Beat Bühler

Figure 29 : Crèche 24 berceaux (pisé) – Palais de l’Alma, Photographe : Florent Michel

Figure 30 : Mur en pisé enduit, BAUEN

Figure 31 : Plan & Coupe d’origine de la Maison 24h

Figure 32 : Modélisation de la Maison 24h

Figure 33 : Photo intérieur de la Maison 24h en 1990

Figure 34 : Graphique des DJU par an, UGA

Figure 35 : Graphique de la consommation par an, UGA

Figure 36 : Tableau récapitulatif des températures en Janvier 2019, produit par l’auteur

Figure 37 : Tableau récapitulatif des l’humidité en Janvier 2019, produit par l’auteur

Figure 38 : Tableau récapitulatif de la Consommation énergétique en Janvier 2019, produit par l’auteur

Figure 39 : Tableau récapitulatif des températures en Juillet 2022, produit par l’auteur

Figure 40 : Tableau récapitulatif de l’humidité en Juillet 2022, produit par l’auteur

Figure 41 : Tableau récapitulatif de la consommation énergétique en Juillet 2022, produit par l'auteur

Figure 42 : Tableau récapitulatif des températures en Décembre 2023, produit par l'auteur

Figure 43 : Tableau récapitulatif de l'humidité en Décembre 2023, produit par l'auteur

Figure 44 : Tableau récapitulatif de la consommation énergétique en Décembre 2023, produit par l'auteur

Figure 45 : Tableau récapitulatif des températures en Juillet 2024, produit par l'auteur

Figure 46 : Tableau récapitulatif de l'humidité en Juillet 2024, produit par l'auteur

Figure 47 : Tableau récapitulatif de la consommation énergétique en Juillet 2024, produit par l'auteur

Figure 48 : Graphique représentant les températures en Janvier 2019, produit par l'auteur

Figure 49 : Graphique représentant les températures en Décembre 2023, produit par l'auteur

Figure 50 : Graphique représentant le déphasage en Janvier 2019, produit par l'auteur

Figure 51 : Graphique représentant le déphasage en Décembre 2023, produit par l'auteur

Figure 52 : Graphique représentant l'humidité en Janvier 2019, produit par l'auteur

Figure 53 : Graphique représentant l'humidité en Décembre 2023, produit par l'auteur

Figure 54 : Graphique représentant la consommation énergétique en Janvier 2019, produit par l'auteur

Figure 55 : Graphique représentant la consommation énergétique en Décembre 2023, produit par l'auteur

Figure 56 : Graphique représentant les températures en Juillet 2022, produit par l'auteur

Figure 57 : Graphique représentant les températures en Juillet - Août 2024, produit par l'auteur

Figure 58 : Graphique représentant le déphasage en Juillet 2022, produit par l'auteur

Figure 59 : Graphique représentant le déphasage en Juillet - Août 2024, produit par l'auteur

Figure 60 : Graphique représentant l'humidité en Juillet 2022, produit par l'auteur

Figure 61 : Graphique représentant l'humidité en Juillet - Août 2024, produit par l'auteur

Figure 62 : Graphique représentant la consommation énergétique en Juillet 2022, produit par l'auteur

Figure 63 : Graphique représentant la consommation énergétique en Juillet - Août 2024, produit par l'auteur

Figure 64 : Graphique représentant les températures en Janvier 2019, produit par l'auteur

Figure 65 : Graphique représentant les températures en Juillet 2022, produit par l'auteur

Figure 66 : Graphique représentant l'humidité en Janvier 2019, produit par l'auteur

Figure 67 : Graphique représentant l'humidité en Juillet 2022, produit par l'auteur

Figure 68 : Graphique représentant la consommation énergétique en Janvier 2019, produit par l'auteur

Figure 69 : Graphique représentant la consommation énergétique en Juillet 2022, produit par l'auteur

Figure 70 : Mur en pisé

Figure 71 : La Maison 24h aujourd'hui

Figure 72 : Enduit à l'argile avec incrustation de paille

Figure 73 : Schéma des dispositifs passifs

Figure 74 : Impression 3D en terre crue

Figure 75 : Mur trombe en terre crue, IAUR

Figure 76 : Chantier participatif Amacò, Photographe : Pierre Yves BRUNAUD

Figure 77 : Graphique de température intérieur et extérieur selon DIAL+ pour le scénario 1

Figure 78 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 1 (Classe II)

Figure 79 : Graphique de température intérieur et extérieur selon DIAL+ pour le scénario 2

Figure 80 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 2 (Classe I)

Figure 81 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 2 (Classe II)

Figure 82 : Graphique de température intérieur et extérieur selon DIAL+ pour le scénario 3

Figure 83 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 3 (Classe II)

Figure 84 : Graphique de température intérieur et extérieur selon DIAL+ pour le scénario 4

Figure 85 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 4 (Classe II)

Figure 86 : Graphique de température intérieur et extérieur selon DIAL+ pour le scénario 5

Figure 87 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 5 (Classe I)

Figure 88 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 5 (Classe II)

Figure 89 : Graphique de température intérieur et extérieur selon DIAL+ pour le scénario 6

Figure 90 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 6 (Classe I)

Figure 91 : Graphique de confort thermique intérieur selon DIAL+ pour le scénario 6 (Classe II)

Figure 92 : Mur en pisé, Equipo de Arquitectura

Figure 93 : Mur en pisé, Equipo de Arquitectura

Figure 94 : Mur en pisé

Figure 95 : Plan de la maison 24h actuellement

Figure 96 : Extrait du journal, Campus, 24 novembre 1986

Figure 97 : Extrait de l'article Le retour à la terre

Figure 98 : Extrait du journal, Les affiches de Grenoble et du Dauphiné, 16 janvier 1987

Figure 99 : Extrait du dossier de construction de la maison 24h

Figure 100 : Plan masse, Extrait du dossier de construction de la maison 24h



Dans un monde où le climat se dérègle et où les matériaux s'épuisent, la terre crue réapparaît comme une alliée humble et puissante. Ce mémoire invite à redécouvrir cette matière première, façonnée par des millénaires et pourtant étonnamment contemporaine. À travers les reliefs des Alpes françaises, où le froid, l'humidité et l'amplitude thermique mettent les bâtiments à l'épreuve, il explore comment la terre, simple et locale, peut créer un confort intérieur doux et constant.

Entre traditions vernaculaires, innovations modernes et observation sensible du bâti, cette recherche révèle une architecture où la matière devient protectrice, et où les murs respirent au rythme du climat. Une architecture silencieuse, enracinée, capable d'offrir un confort invisible, presque naturel — comme si la maison elle-même se souvenait de la terre dont elle est issue.