



HAL
open science

L'isolation thermique des murs en pisé par l'extérieur avec des matériaux bio et/ou géo sourcés : état des lieux de la pratique professionnelle actuelle et analyse des solutions techniques

Manon Girerd

► To cite this version:

Manon Girerd. L'isolation thermique des murs en pisé par l'extérieur avec des matériaux bio et/ou géo sourcés : état des lieux de la pratique professionnelle actuelle et analyse des solutions techniques. Architecture, aménagement de l'espace. 2016. dumas-04472910

HAL Id: dumas-04472910

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04472910>

Submitted on 22 Feb 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

ECOLE NATIONALE SUPERIEUR D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE

BP 2636 – 60, Avenue de Constantine – 38036 GRENOBLE Cedex 2

Mémoire du diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement

DSA - « Architecture de terre, cultures constructives et développement durable »

Année universitaire : 2020-2022

L'isolation thermique des murs en pisé par l'extérieur avec des matériaux bio et/ou géo sourcés

État des lieux de la pratique professionnelle actuelle et
analyse des solutions techniques



Manon Girerd

Ingénieur « Bâtiment, Energie, Environnement »

ECOLE NATIONALE SUPERIEUR D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE

BP 2636 – 60, Avenue de Constantine – 38036 GRENOBLE Cedex 2

Mémoire du diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement

DSA - « Architecture de terre, cultures constructives et développement durable »

Année universitaire : 2020-2022

L'isolation thermique des murs en pisé par l'extérieur avec des matériaux bio et/ou géosourcés

État des lieux de la pratique professionnelle actuelle et analyse des solutions techniques

Directeur d'étude

Martin Pointet, Architecte, Maître de Conférences en Sciences et Techniques pour l'Architecture (ENSAG), chercheur Unité de recherche AE&CC – CRAterre

Membres de jury

Hugo Gasnier, Docteur en Architecture, Maître de Conférences associé en Théorie et Pratique de la Conception Architecturale Urbaine (ENSAG), chercheur Unité de recherche AE&CC – CRAterre

Andreas Krewet, Ingénieur en BE, TerreEnergieConseil (SCOP Cabestan), Fondateur d'AKTerre, Membre du CA de l'AsTerre

Sébastien Moriset, Architecte, Enseignant-chercheur AE&CC – ENSAG

Martin Pointet, Architecte, Maître de Conférences en Sciences et Techniques pour l'Architecture (ENSAG), chercheur Unité de recherche AE&CC – CRAterre

Claude Salerno, Architecte, enseignant ENSAG, chercheur Unité de recherche AE&CC

ENSAG, 6 Novembre 2023

REMERCIEMENTS

Merci à toute l'équipe d'AMACO qui m'a accueillie pendant une année et demie. Merci particulièrement à mes collègues du pôle opérationnel : Sophie Bioul, Gabin Wurth, Patrick Ribet, Lionel Ronssoux et Anastasia Terres. L'ensemble des échanges et réflexions menés avec l'équipe a permis d'accroître mes connaissances dans le domaine de la terre crue et de soulever de nouveaux questionnements. Sans cette expérience professionnelle, ce travail n'aurait pas été possible. Merci en particulier à Vincent Trabaud, Sophie Bioul et Hugo Spack pour leur aide précieuse et leur collaboration, notamment lors de la phase de recherche de cas d'étude pour appuyer mon analyse. Je suis également reconnaissante de la confiance accordée par Laetitia Fontaine durant mon expérience chez AMACO.

Merci à mon directeur de mémoire ; Martin Pointet, pour son temps consacré, son aide et ses commentaires pertinents qui ont pu rediriger certaines de mes réflexions. Merci pour cet accompagnement tout au long de mes recherches et pour l'aide à la structuration de ce mémoire. Merci également pour l'ensemble des documents fournis et cas d'études proposées sur lesquels j'ai pu appuyer mon mémoire.

Merci à l'équipe du LOCIE, qui, de par le sujet de thèse proposé, m'a permis d'orienter le sujet de ce mémoire. Merci à Olivier Plé et Noémie Prime pour leur temps consacré. Merci pour votre regard scientifique avisé et vos commentaires qui m'ont permis de très justement préciser ou orienter certaines recherches.

Merci aux trois artisans et formateurs : Luc Van Nieuwenhuyze, Julien Cerri et Noé Solsona, pour le temps consacré à mes interviews téléphoniques et pour l'ensemble des documents fournis pour appuyer mes recherches. Parce qu'il est indispensable d'avoir au cœur d'une réflexion comme celle-ci l'avis et les retours d'expériences de "personnes de terrain", merci pour vos retours et partages d'expériences qui ont pu souligner des réalités de chantier très pertinentes.

Merci enfin, aux différents architectes, bureaux d'études ou sociétés avec lesquels j'ai eu la chance d'échanger sur des projets réalisés, vos retours d'expériences ont été précieux pour le contenu de ce mémoire. Merci particulièrement à Claramunt Gauthier, co-gérant de Dauphin architecture, à Cheveau Laurent, co-gérant de la SCOOP Ecozimum, à l'architecte et gérant de la société Domébio, ainsi qu'à l'architecte Estelle Morle.

En cette fin de formation, je remercie tout particulièrement Alba Rivero, ma voisine, qui m'a transmis en première sa passion pour la terre et qui m'a poussée à m'inscrire au DSA. Ainsi, qu'un grand merci à l'ensemble de l'équipe pédagogique pour leur enseignement au sein du DSA-Terre. Cette formation m'a donné une base solide de connaissance, a su motiver mes convictions et m'a donné de l'élan dans ma réorientation professionnelle.

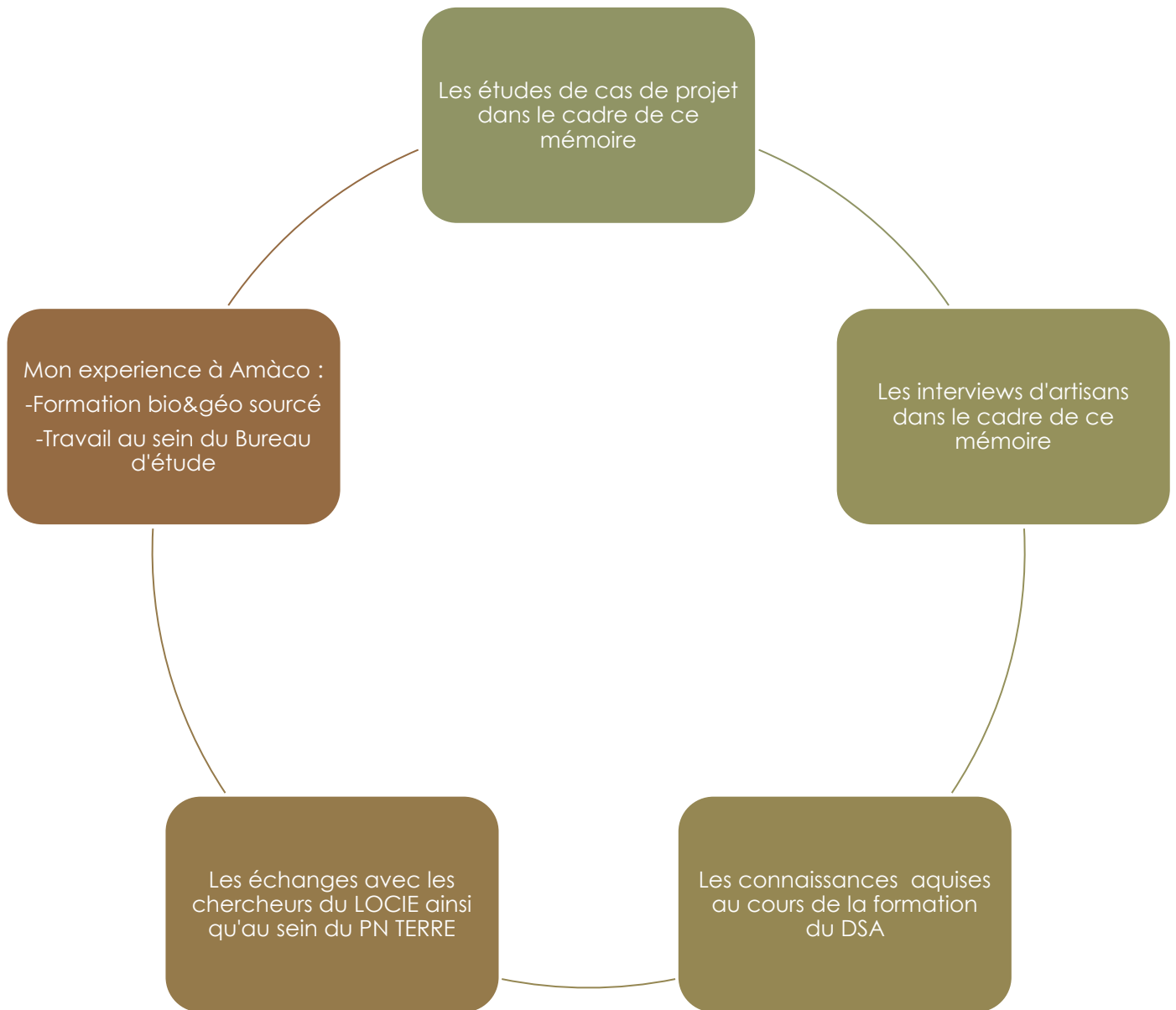
Je souhaite aussi remercier chaleureusement Diana pour ses corrections et Hugo pour son soutien, son écoute et pour m'avoir accompagnée et motivée à pousser ces réflexions qui m'animent.



LOCIE

INTRODUCTION	6
1. LES ENJEUX TECHNIQUES, REGLEMENTAIRES ET ARCHITECTURAUX	9
A. Contexte écologique et réglementation thermique	10
B. Le couplage des phénomènes physiques dans un mur en pisé	11
C. Enjeux de la construction neuve et de la réhabilitation	17
D. Enjeux isolation thermique par l'intérieur (ITI) / isolation thermique par l'extérieur (ITE) sur mur en pisé	20
2. MATERIAUX ET DISPOSITIFS TECHNIQUES POUR ISOLER UN MUR EN PISE PAR L'EXTERIEUR	23
A. Qu'est-ce qu'un isolant bio et/ou géo sourcé ?.....	24
B. Les isolants biosourcés.....	25
C. Les isolants bio-géo sourcés (chaux-chanvre et terre allégée)	28
D. Les dispositifs constructifs en ITE	30
E. Réglementation et référentiels de technique courante.....	31
3. ETUDES DE CAS : ISOLATION THERMIQUE PAR L'EXTERIEUR AVEC DES ISOLANTS BIO-GEO SOURCES ...32	
A. Réhabilitation de mur en pisé isolé par l'extérieur	34
B. Isolation par l'extérieur de mur contemporain en terre	42
C. D'autres exemples d'ITE en bio-géo sourcé	52
D. Synthèse des interviews de trois artisans (avis, Rex et freins)	59
4. ANALYSE	61
A. Analyse des freins et leviers à La réalisation d'une ITE sur un mur en pisé	62
B. Analyse des complexes bio-géo sourcés du corpus et pertinence, analyse des freins et leviers scientifiques.....	62
5. ENJEUX DU SUJET DE THESE	68
CONCLUSION	72
BIBLIOGRAPHIE	74
TABLE DES ILLUSTRATIONS	76
ANNEXES	78

CE QUI A NOURRI CE MEMOIRE



INTRODUCTION



Photographie : Projet Le foyer à Ribérac, architectes : Dauphins architecture,
Crédits photos : Dauphin architecture

Ayant grandi dans une bâtisse en pisé, je côtoie ce matériau depuis petite et suis pleinement convaincue qu'il fait bon vivre dans une maison en terre crue. Ingénieur en bâtiment, énergie et environnement de formation, et conseillère en rénovation énergétique de bâtiment à Paris en 2019, je décide alors de m'inscrire au DSA pour approfondir ma connaissance du matériau terre. Cette reprise d'études suivie de la recherche de stage m'a amenée au sein de l'association Amàco où j'ai eu la chance de travailler pendant un an et demi.

Durant cette expérience à Amàco, j'ai été marquée par la mise en place de la formation « rénover en bio-géo sourcé » d'une semaine à destination d'architectes, d'ingénieurs, d'étudiants et d'entreprises. Penser cette formation sur ce sujet et l'organiser en collaboration avec mes collègues a attisé mon intérêt. Les semaines de formations organisées sur cette thématique m'ont permis de rencontrer des personnes pionnières dans le domaine des isolations bio et géo sourcées avec des intervenants extérieurs différents d'une formation à l'autre. Cette découverte des champs des possibles qui s'offre à nous en matière d'isolation m'a intriguée. En participant au MOOC Fibre sur la thématique de la thermique et en créant du contenu sur cette même thématique dans le cadre de la formation « rénover en bio-géo sourcé », j'ai renoué avec le domaine de la thermique du bâtiment que j'avais abordé en école d'ingénieur.

De retour de voyage et décidée à postuler pour un doctorat dans le domaine de la terre crue, j'ai obtenu **une thèse avec le LOCIE à Chambéry sur la thématique de l'isolation par l'extérieur de bâtiment en pisé**. Par le biais de ce sujet, je touche à deux domaines qui me passionnent ; le matériau terre crue et la thermique du bâtiment. Dans le cadre de cette thèse, trois complexes de mur seront à étudier. C'est donc naturellement que ce mémoire s'inscrit comme une introduction à cette future thèse qui débutera en octobre 2023, en apportant un regard éclairé sur les possibilités qui s'offrent à nous en termes d'isolation de mur en pisé. L'idée étant, à travers ce mémoire, d'aiguiller, orienter les choix de complexes à étudier pour la future thèse et d'avoir une vision globale des enjeux de l'isolation thermique des murs en pisé en neuf comme en rénovation.

Ce sujet de mémoire et, par la suite, de thèse me semble avoir tout son sens vis-à-vis des enjeux environnementaux actuels. L'impact environnemental lié au domaine du bâtiment est important, et il est urgent de trouver des solutions pour rénover et isoler les bâtiments déperditifs avec des matériaux écologiques. Dans l'imaginaire de beaucoup de personnes, la terre est isolante, or cette croyance n'est pas vraie ; bien que d'autres phénomènes physiques entrent en jeu et expliquent le confort apporté par ce matériau, le pisé n'est pas isolant. Force est de constater, à travers ce mémoire, que très peu d'exemples existent en termes d'isolation par l'extérieur de murs en pisé. Il est donc intéressant de se pencher sur le sujet pour faire de cette technique vernaculaire un matériau d'avenir avec des solutions d'isolation répondant aux réglementations thermiques en vigueur, afin de massifier son emploi dans la construction en neuf et en réhabilitation. Le présent mémoire permettra donc de répondre à la question suivante : **Quelles solutions techniques existe-t-il pour isoler par l'extérieur un mur en pisé et lesquelles semblent être pertinentes au regard des critères définis lors de l'analyse ?**

J'aborderai donc ce mémoire selon cinq grands axes. Dans le premier axe, seront abordés les enjeux, tant architecturaux, règlementaires, thermiques et hydriques. Cette première partie constituera une base solide sur laquelle s'appuieront ensuite les réflexions.

Le deuxième axe est orienté vers les matériaux isolants bio et/ou géo sourcés. Une recherche a donc été faite pour chaque matériau afin de créer une fiche de renseignement par matériau (en annexe). Cette fiche de renseignement concerne à la fois les performances thermiques, hydriques, environnementales, ainsi que les différents produits, mise en œuvre et formes que prennent chaque isolant. Suite à cela, une analyse des avantages et inconvénients de chaque isolant a été faite (tableaux en annexe également). Enfin, un récapitulatif est intégré dans ce mémoire pour chaque matériau.

Le troisième axe est orienté sur les complexes de murs isolants et leurs mise en œuvre à travers des cas d'études concrets réalisés sur des murs en pisé neuf ou en réhabilitation. Pour ce troisième axe, il a été nécessaire dans un premier temps de recenser les projets existants, de prendre contact avec les acteurs

de ces projets et de réaliser des fiches explicatives du projet, des coupes et détails, ainsi qu'un récapitulatif des points importants à retenir en matière d'isolation. Enfin, l'interview de trois artisans m'a éclairée sur les freins et les pratiques actuelles. Les interviews et le corpus étudié forment une base sur laquelle j'ai pu appuyer mon analyse finale.

La quatrième partie est une analyse complète de l'ensemble des solutions et matériaux existants en s'appuyant sur le corpus de cas d'étude et sur les interviews réalisées. Elle contient également une analyse des freins et des leviers selon quatre critères ; la matérialité, l'impact environnemental, la continuité physique du complexe et la mise en œuvre.

Enfin, la cinquième partie contient les premières pistes de réflexion concernant les recherches à mener dans le cadre de la thèse afin de répondre à certaines problématiques soulevées dans la quatrième partie.

«L'environnement bâti ne doit plus être perçu comme un problème, mais comme un tremplin vers des solutions potentielles. Nous devons simplement réduire l'emploi de matériaux d'origine fossile à l'indispensable, et utiliser aussi souvent que possible des matériaux biosourcés, géosourcés ou issus du réemploi, ainsi que des matériaux secondaires « zéro carbone », tels que les terres d'excavations. La technologie magique qui nous sauverait tous n'existe pas, ou, si elle existe, elle arrivera trop tard. Alors sans hésiter, mettons en œuvre de la terre et des fibres pour soigner le monde»

1

Guillaume Habert,

Directeur de la chaire de construction durable de l'ETH Zurich

¹ Dominique Gauzin-Müller and Aurelie Vissac, *TerraFibra architectures* (Paris: Pavillon de l'Arsenal, 2021).

1. LES ENJEUX TECHNIQUES, REGLEMENTAIRES ET ARCHITECTURAUX

Le matériau pisé pour réguler l'hygrométrie d'une piscine,
Piscine municipale de Toro en Espagne,
Maitre d'œuvre : VIER arquitectos,
Photos : Hector Santos-Diez

A. Contexte écologique et réglementation thermique

En France, selon les données issues du ministère de la transition écologique et de l'énergie, le secteur du bâtiment représente 44 % de l'énergie consommée. De plus, le chauffage compte pour deux tiers des consommations d'énergie dans le logement. Concernant les émissions de CO₂, 17 % de ces émissions sont dues au secteur du bâtiment, dont 40 % sont émises pendant la phase d'exploitation du bâtiment et 60% durant la phase de construction. Chaque année, le secteur du bâtiment émet plus de 123 millions de tonnes de CO₂, ce qui en fait l'un des domaines clés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique. Dans le contexte actuel, il est impératif de limiter à la fois les consommations d'énergie des bâtiments en phase d'exploitation (notamment par le biais de l'isolation), d'utiliser des matériaux de construction à faible impact environnemental et de privilégier la réhabilitation plutôt que la construction neuve pour réduire l'impact global des phases de construction ².

La réglementation thermique a pour but de limiter les consommations énergétiques en fixant des exigences à respecter et/ou des limites de consommation maximale à ne pas dépasser. La dernière réglementation thermique en vigueur est **la RE 2020**. Cette réglementation introduit une innovation majeure : elle ne contrôle plus seulement la consommation énergétique des bâtiments neufs, mais aussi leur bilan carbone, en incluant l'analyse du cycle de vie des matériaux employés³.

C'est pour ces raisons que l'isolation performante des bâtiments avec des matériaux à faibles impacts environnementaux est un enjeu majeur au vu du contexte actuel et de la réglementation en vigueur.

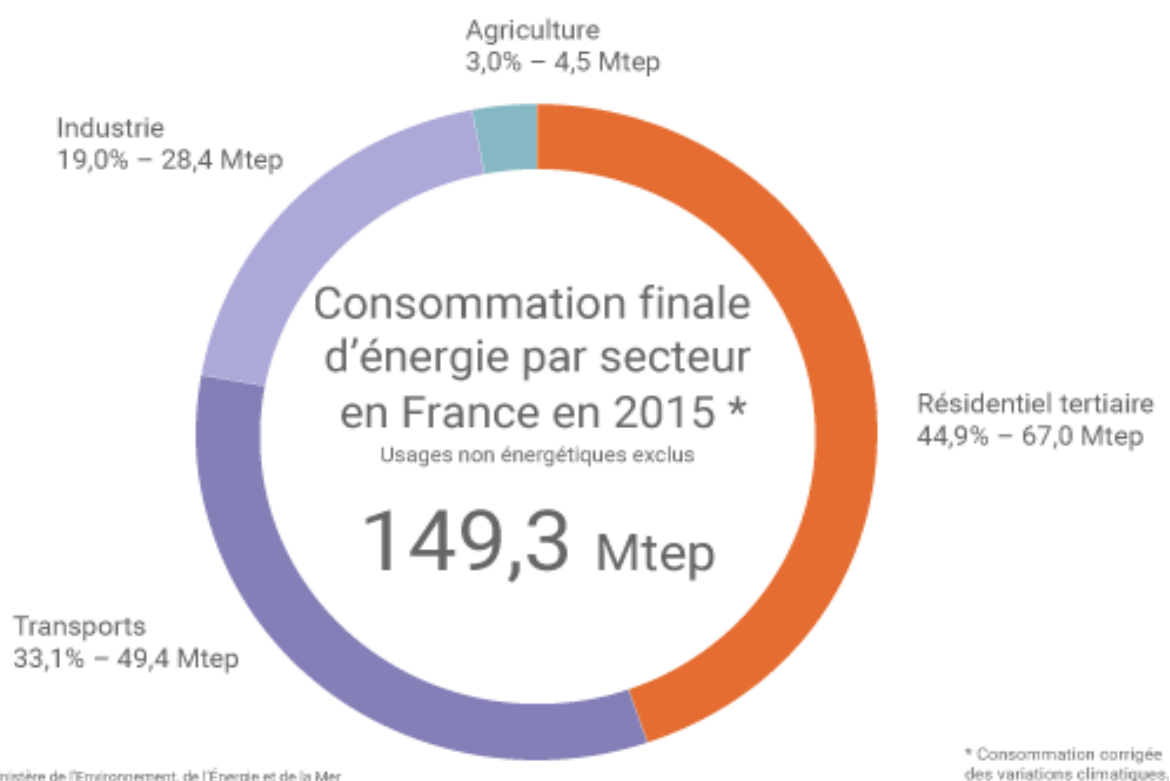


Figure 2 : Consommation énergétique nationale par secteur d'activité en France en 2015, source : Ministère de l'Environnement de l'Energie

² ADEME, 'Impact environnemental du bâtiment', Agence de la transition écologique.

³ Ministère de la Transition écologique, 'Réglementation environnementale RE2020'.

B. Le couplage des phénomènes physiques dans un mur en pisé

Le pisé un matériau non isolant mais qui contribue au confort

La résistance thermique d'un mur définit son pouvoir isolant. Plus elle est grande, plus le coefficient de transmission surfacique U sera faible et plus le matériau est isolant (*Explications Annexe 1*).

Pour un mur de 50cm de pisé, avec $\lambda_{\text{pisé}} = 1.1 \text{ W/m.K}$ (pour un pisé de masse volumique de 2000 kg/m^3 en climat humide), on obtient une résistance thermique du matériau de **$0.45 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$** . Or, un complexe de mur performant a une résistance thermique qui se situe autour de 3 à $7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, comme indiqué par Vincent Pierre (le toit vosgien) lors de son intervention à Amàco dans le cadre de la formation « bio-géo sourcés ». Une réflexion globale à l'échelle du bâtiment est à mettre en place, ainsi certains murs peuvent être plus ou moins isolés en fonction de la pertinence pour atteindre la performance globale de la RE2020.

Le pisé n'est pas isolant mais il est doté de propriétés thermo physiques qui en font un régulateur de température et d'hygrométrie. Cela lui permet de contribuer fortement au confort d'un bâtiment en été comme en hiver. Ces propriétés physiques sont conservées à condition d'isoler avec le bon isolant.

Le pisé un matériau à forte Inertie / déphasage

L'inertie thermique est la capacité du matériau à stocker et déstocker de la chaleur/fraîcheur. La capacité thermique massique (c) indique la quantité de chaleur à fournir à 1 kg du matériau pour élever sa température de 1 K . Cette propriété, multipliée par la masse volumique, détermine la capacité thermique volumique du matériau (caractérisée en $\text{J/m}^3 \cdot \text{K}$), qui est responsable de l'inertie thermique apportée par le matériau à une structure. On

remarque dans le tableau du Cerema (*annexe n°2*) que l'inertie à proprement parler de la terre crue est sensiblement la même que le matériau béton, à la différence qu'un mur en terre crue est souvent mis en œuvre avec une épaisseur bien supérieure, qui lui confère donc une meilleure inertie. Cependant, d'autres phénomènes interviennent dans un mur en terre crue, et il est possible que les changements de phases de l'eau contenus dans le matériau, par le phénomène de chaleur latente, viennent contribuer à augmenter l'inertie thermique apparente des murs et contribuer au confort dans l'habitation. Afin de conserver cette inertie thermique, il semble cohérent d'envisager plutôt une ITE qu'une ITI, comme on le verra par la suite dans ce mémoire.



Figure 3 : Utilisation de l'inertie du pisé, Maison Piazza Pintgia, Almens, Suisse 2013, Maître d'oeuvre : gujan + pally architekten, Réalisation : Martin Rauch

Dans le cadre des travaux de l'ENTPE⁴, on trouve un exemple de mur en pisé appareillé afin de déterminer le déphasage du pic de chaleur. Il a été mesuré à 6 heures pour un mur de 50 cm. Le graphique montre que la température intérieure du logement inhabité décroît régulièrement la nuit et rejoint celle du mur. Par contre, elle s'élève rapidement en milieu de journée grâce

⁴ Philippe Heitz and others, *L'isolation du pisé : pertinence et principes* (Vaulx en Velin: ENTPE, 2015).

aux apports solaires des vitrages et à l'élévation de la température extérieure. Sa retombée est nettement limitée par la restitution nocturne de chaleur du pisé. Un calcul purement thermique a mis en évidence que ce fort déphasage ne peut pas être expliqué par la seule capacité thermique du matériau. Il est ainsi possible que les changements de phases de l'eau, par le phénomène de chaleur latente, viennent contribuer à augmenter l'inertie thermique apparente des murs. En effet, le pisé est un matériau avec des transferts couplés de chaleurs, d'eau et de vapeur à prendre en compte dans leur globalité pour bien comprendre le fonctionnement du matériau. **Le pisé est en capacité de stocker/déstocker la chaleur et de retarder le pic de chaleur.**

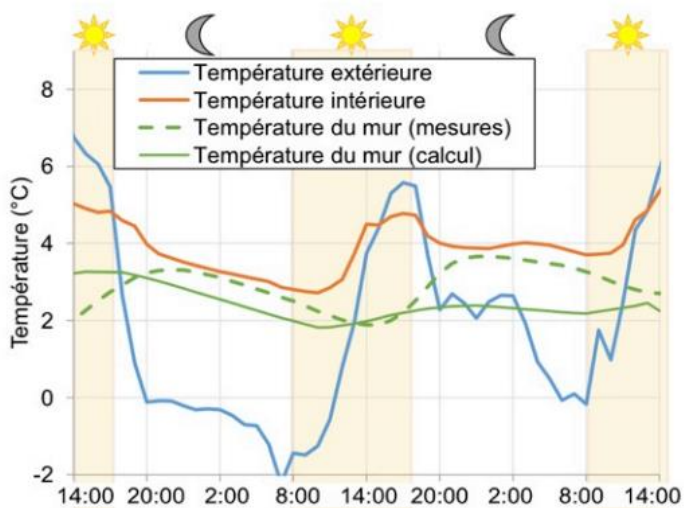


Figure 4 Courbe de température au cours de la journée, source : l'isolation du pisé : pertinence et principes

Les sources d'humidité dans un mur en terre crue

Comme souligné dans le document « bâti ancien et humidité »⁵, Les sources d'humidité dans le bâtiment sont nombreuses et sont repérées ci-dessous dans un schéma. On retrouve l'humidité :

- Liée aux intempéries et infiltrations (1)
- Liée aux remontées capillaires (2)
- Liée à l'eau ou vapeur d'eau contenue dans les matériaux de construction (3)
- Liée aux dégâts des eaux (4)
- Liée à la condensation de la vapeur d'eau produite dans le logement (5)

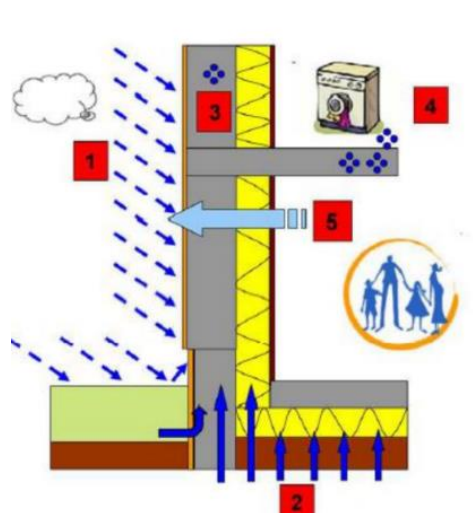


Figure 5 Source d'humidité dans le bâtiment, schémas issus du PDF « bâti ancien et humidité »

⁵ Faire, Energence, and Tinergie, 'Bâti Ancien et Humidité' (ADEME).

Le pisé un matériau perspirant

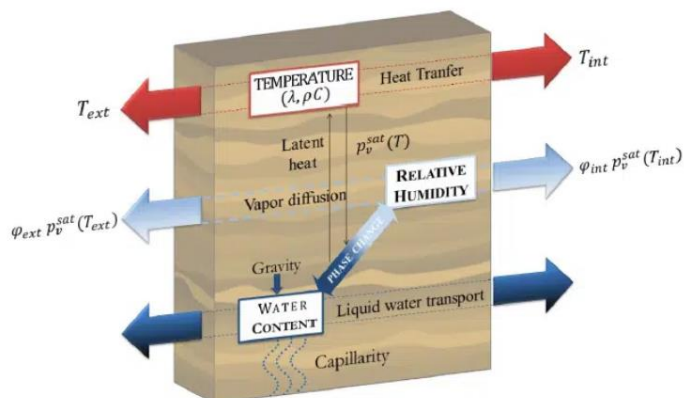


Figure 7: Schematic representation of heat and moisture transfers within an earth wall, Thèse Lucile Soudani

La vapeur d'eau cherche à traverser les parois en se déplaçant du milieu où elle est en forte concentration vers les milieux où elle est en faible concentration (le sens de transfert de vapeur d'eau en hiver est en général de l'intérieur vers l'extérieur). C'est le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau « μ » et l'épaisseur équivalente de diffusion S_d qui renseignent la perméabilité d'un matériau (explication en annexe 1).

On remarque que le matériau terre est perméable à la vapeur d'eau avec un coefficient μ compris entre 10 et 6 en fonction des techniques mises en œuvre⁶. Cette capacité à être perspirant, permet au pisé d'évacuer le trop-plein de vapeur d'eau d'un côté à l'autre du mur. Il est donc important de mettre en œuvre des isolants eux aussi perspirants contre un mur en pisé pour conserver les avantages hygrométriques du mur et éviter les risques de condensation.

⁶ 'Les Règles Professionnelles', RFCP, 2014.

⁷ Florian Champiré, 'Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue

Le pisé un matériau hygroscopique

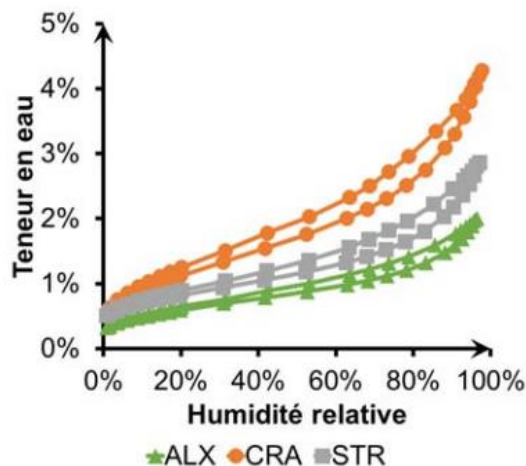


Figure 6 Isothermes de sorption à 23°C d'échantillons de pisé prélevé sur des murs existants, source : Thèse de M. Florian Champiré

Le pisé est hygroscopique, cela signifie qu'il est capable de stocker et déstocker de l'humidité dans ses pores, ce qui en fait un « régulateur d'humidité ambiante » et potentiellement un retardateur de condensation interne à la paroi.

Le caractère hygroscopique d'un matériau est caractérisé par des courbes isothermes de sorption-désorption, qui font le lien entre l'humidité relative de l'ambiance et la teneur en eau du matériau, à une température donnée. On trouve les courbes d'adsorption/désorption ci-après, pour trois échantillons de pisé existant, dans le travail de thèse de M. Florian Champiré⁷.

L'isotherme de sorption/désorption est composée de deux courbes, une pour la sorption, l'autre pour la désorption. Ceci révèle l'existence d'une hystérésis entre la sorption et la désorption, qui est plus ou moins importante selon les matériaux. Plus la courbe est haute, plus le matériau admet une teneur en eau importante. **Le matériau pisé étant hygroscopique, il va pouvoir agir comme un régulateur d'humidité pour l'ambiance intérieure du logement.**

compactée pour la construction' (phdthesis, Université de Lyon, 2017).

Le pisé matériau capillaire

Comme indiqué dans une étude du Cerema⁸, le coefficient d'absorption liquide A ($\text{kg.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$) caractérise la capacité du matériau à absorber de l'eau liquide par capillarité. Dans la thèse de M.Chabriac⁹, les valeurs obtenues pour ce coefficient se situent entre 0.37 et 0.62 $\text{kg.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ en fonction des terres étudiées (à titre comparatif le béton de ciment a un coefficient de 0.03 $\text{kg.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$).

Le pisé est poreux : les espaces microscopiques entre les grains d'un pisé sain contiennent de l'air, de la vapeur d'eau et de l'eau. Les pores communicants entre eux forment un réseau, voie de circulation des fluides gazeux (air, vapeur) ou liquide (eau). La capillarité du matériau pisé entraîne une réflexion quant aux matériaux mis en place pour l'isoler. En effet, l'eau sous forme liquide présente dans le mur (eaux de pluie, condensations interstitielles, remontées capillaires) ne peut être évacuée qu'à condition que l'ensemble des matériaux mis en œuvre soient également capillaires (l'eau va migrer de la zone humide à une zone plus sèche pour être évacuée). **On note ici l'importance d'opter pour un matériau isolant capillaire en cas d'isolation d'un mur en pisé.**



Figure 8 Le pisé un matériau poreux, Source : site internet Amàco, L'esthétique de strates du pisé est sublimé par des jeux de couleurs. Auteur de l'œuvre : Atelier Alba.

⁸ Elodie Héberlé, 'Synthèse Bibliographique Des Études Sur La Rénovation Thermique Du Bâti Ancien à l'aide de Matériaux Isolants Biosourcés', 2016.

⁹ Pierre-Antoine Chabriac, 'Mesure Du Comportement Hygrothermique Du Pisé' (PhD Thesis, ENTPE ; CNRS-LTDS (UMR 5513), 2014)

Les transferts couplés de chaleur, d'eau et de vapeur

Dans le document « l'isolation du pisé : pertinence et principes »¹⁰, l'équipe qui conduit depuis 2013 des recherches sur le comportement hygrothermique du pisé (sur échantillons, maquettes et murs) propose le résultat suivant concernant la caractérisation des transferts de chaleur, de vapeur et d'eau au sein du pisé :

« Un résultat important concerne le comportement hygrothermique, c'est-à-dire le couplage qui peut exister entre les transferts de chaleur, les transferts d'eau (liquide et vapeur) et le cycle de condensation-évaporation de l'eau. C'est parce que le pisé a une structure microporeuse ouverte qu'il apporte un tel confort de régulation de l'ambiance d'un logement : s'il fait froid, la vapeur d'eau du logement rentre dans le mur (circulation du chaud vers le froid), le traverse pour partie, l'autre partie se condense et se fixe à la surface des grains. La condensation dégage de la chaleur (chaleur latente). S'il fait chaud, l'air extérieur chaud et sec rentre dans le mur, le traverse et évapore petit à petit l'eau stockée dans les pores. L'évaporation consomme de la chaleur (chaleur latente). L'air arrive au logement rafraîchi et humidifié. »

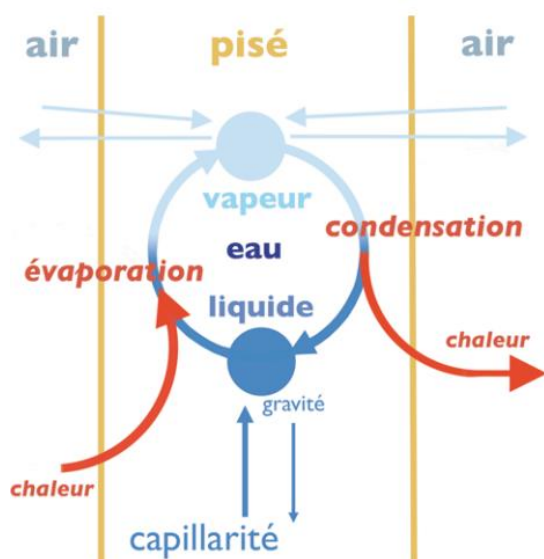


Figure 10 : couplage de transfert, source : l'isolation du pisé pertinence et principes

¹⁰ Heitz and others.

¹¹ Jean-Marie Le Tiec and others, *Construire en pisé: prescriptions de dimensionnement et de mise en oeuvre* (Antony: Le Moniteur, 2020).

On voit bien ici que l'atout majeur du matériau pisé est justement un couplage de phénomènes qui ensemble vont garantir une parfaite régulation de température et d'humidité. Il suffit de pénétrer en été dans une maison en pisé pour ressentir tous les bénéfices de ce matériau.

Le pisé un matériau altérable par l'eau

Le pisé contient de l'eau jusqu'à une certaine limite. Un lien très clair a été établi entre l'augmentation de la teneur en eau du pisé et la diminution de sa résistance à la compression. Ainsi, les dispositions constructives suivantes doivent être intégrées : la mise en œuvre d'un sous-bassement et d'une couverture protectrice¹¹.

Dans le cadre du programme de recherche « béton d'argile environnemental »¹², des essais ont été réalisés sur une terre à pisé (cf. graphique ci-dessous). D'autres essais ont été menés au LGCB sur des échantillons de pisé. Il a été constaté une diminution de la résistance à la compression à partir de 5% de teneur en eau. De plus, en 2012, le laboratoire a prélevé des échantillons de pisé à Lyon suite à un effondrement avec des teneurs en eau situées autour de 11-13%.

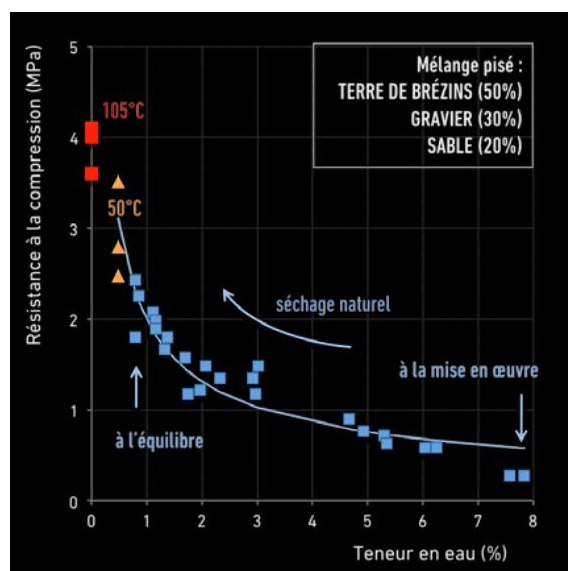


Figure 9 lien entre résistance et teneur en eau, source : Béton d'argile environnemental, Une publication amàco et CRAterre-AE&CC-ENSAG

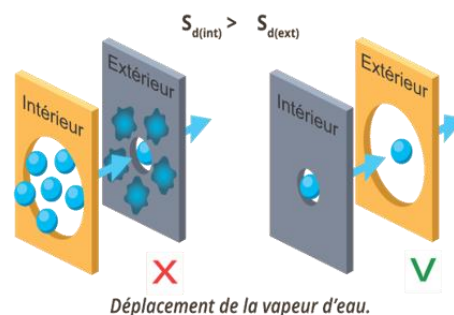
¹² Mariette Moevus and others, *Projet : Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) : synthèse à destination des responsables des politiques publiques* (Grenoble: CRAterre-ENSAG, 2013).

L'humidification excessive du pisé est donc à proscrire, elle peut en effet entraîner des dégâts majeurs. En effet, le noyage par l'eau liquide des tensions superficielle entre les phases liquide et gazeuse entraîne une force de cohésion capillaire qui s'annule et l'argile devient progressivement plastique. De plus, certaines argiles ont un fort pouvoir d'adsorption d'eau et gonflent, entraînant par exemple un décollement d'enduit. **Il est donc primordial de réaliser un diagnostic avant toute isolation pour traiter les pathologies préexistantes pouvant amener à une humidité excessive dans les parois par exemple.**

Règles à adopter pour limiter le risque de condensation par saturation de vapeur d'eau

Comme indiqué dans le document publié par l'AQC « Maîtriser la migration de vapeur d'eau dans les parois »¹³, pour limiter le risque de condensation (explication à l'annexe n° 4), une règle simple est à observer : Il est important de mettre en œuvre des matériaux avec des résistances à la migration de vapeur d'eau décroissantes de l'intérieur vers l'extérieur. C'est-à-dire que les valeurs S_d des couches de matériaux mises en place doivent être supérieures du côté intérieur et inférieures du côté extérieur.

De plus, en première approche, un calcul statique permet de réaliser une vérification du complexe dans le cas le plus défavorable et éliminer tout risque de condensation via le diagramme de Glaser. Pour les cas les plus critiques, un calcul dynamique (WUFI) doit être réalisé. Une condensation dite interstitielle peut être tolérée dans un élément de construction, dans certaines limites, mais le séchage doit être garanti durant les mois chauds de l'année, sinon l'isolation ne sera plus efficace.



■ Matériau avec une forte résistance à la diffusion de vapeur d'eau. ■ Matériau avec une faible résistance à la diffusion de vapeur d'eau.

Figure 11 : Règles liées à la perméabilité des matériaux pour éviter la condensation, source : Maîtriser la migration de vapeur d'eau dans les parois, AQC

Récapitulatif

Dans le document « isolation du pisé pertinence et principes », l'efficacité hygrothermique des murs en pisé est confirmée. Parce qu'ils sont denses, à forte capacité calorifique, à forte microporosité, à grande capacité de rétention d'eau, ils se comportent comme un amortisseur des variations de température et d'hygrométrie du logement. Bien que le pisé ait un pouvoir régulateur hygroscopique et capillaire, nous avons vu dans cette partie qu'une isolation du pisé était nécessaire pour limiter les déperditions de paroi (le pisé n'est pas isolant), à condition que cette dernière soit réalisée avec des isolants adéquats pour continuer de bénéficier du confort apporté par le pisé.

¹³ AQC, 'Maîtriser la migration de vapeur d'eau dans les parois', 2023.

C. Enjeux de la construction neuve et de la réhabilitation

Réhabiliter le bâti ancien

« Lors de la réhabilitation d'un bâtiment en pisé, il est intéressant d'intégrer les valeurs qu'il incarne. Celles-ci peuvent être architecturales, mais aussi historiques, esthétiques, culturelles, éducatives, économiques »¹⁴. Dans l'ouvrage « Réhabiliter le pisé », est soulignée l'importance de l'observation d'un bâtiment avec une pluralité de voix afin de définir le plus justement les valeurs portées par un bâtiment. De la qualité de cette analyse dépendra la pertinence des décisions prises par la suite, comme d'opter pour une intervention lourde ou minimale, de respecter l'authenticité des matériaux et des formes, de restaurer des savoir-faire anciens.

De plus, dans le cadre d'un projet de rénovation, la réalisation d'un diagnostic en amont de la conception est essentielle. En effet, des problématiques de remontées capillaires peuvent préexister, et dans ce cas, le fait d'isoler un mur peut mettre en danger la tenue de ce dernier. En effet, avec l'isolant rajouté, l'eau présente dans le mur aura plus de mal à s'évacuer (c'est d'autant plus vrai si l'isolant mis en place n'est pas suffisamment capillaire). De plus, la nature de l'enduit existant doit être identifiée, et si ce dernier est en ciment (non perméable), un décrouitage doit être prévu avant application d'une ITE afin de permettre au mur d'être perméable. Il est primordial de régler l'ensemble des pathologies d'un mur existant avant de procéder à son isolation ou d'adopter des logiques constructives adéquates aux problématiques préexistantes. Par exemple, dans le cas de murs anciens avec des problématiques de remontées capillaires, on peut opter pour une isolation rehaussée qui démarre au-dessus du niveau des sous-bassements en pierre (bien que cette solution laisse apparaître un pont thermique, elle permet à l'eau présente au niveau des sous-bassements de s'évacuer).

Dans le document « isolation du pisé pertinence et principes »¹⁵, on retrouve l'affirmation suivante suite à l'appareillage d'un mur en pisé ; « Les enregistrements de température et de teneur en eau des murs de la maison révèlent, en hiver et en l'absence de chauffage et de fermeture de la maison, un fort impact de l'apport solaire ». Afin de bénéficier de ces apports, une réflexion globale doit avoir lieu concernant les murs à isoler ou non. Il est notamment possible de conserver un ou plusieurs murs en pisé non isolés pour s'en servir comme mur « capteur d'énergie », à condition que l'objectif global de performance thermique soit atteint.

Une réflexion globale doit donc être menée pour concilier les valeurs patrimoniales, la stabilité structurelle, la performance énergétique et la qualité architecturale du bâti.

On remarque que le bâti ancien en pisé est composé de constructions monolithiques percées de petites ouvertures, avec des trous de boulins apparent où les quatre murs sont constitués de pisé. Les réhabilitations réalisées sont souvent à destination d'habitation. Les murs en pisé sont épais et mesurent entre 50 et 60 cm de large. On retrouve, par ailleurs, la coupe axonométrique suivante dans l'ouvrage « réhabiliter le pisé »¹⁶ concernant le bâti ancien traditionnel en pisé.

¹⁴ Sébastien Moriset and others, *Réhabiliter Le Pisé*, ed. by CRAterre (actes sud, 2018).

¹⁵ Heitz and others.

¹⁶ Moriset and others.

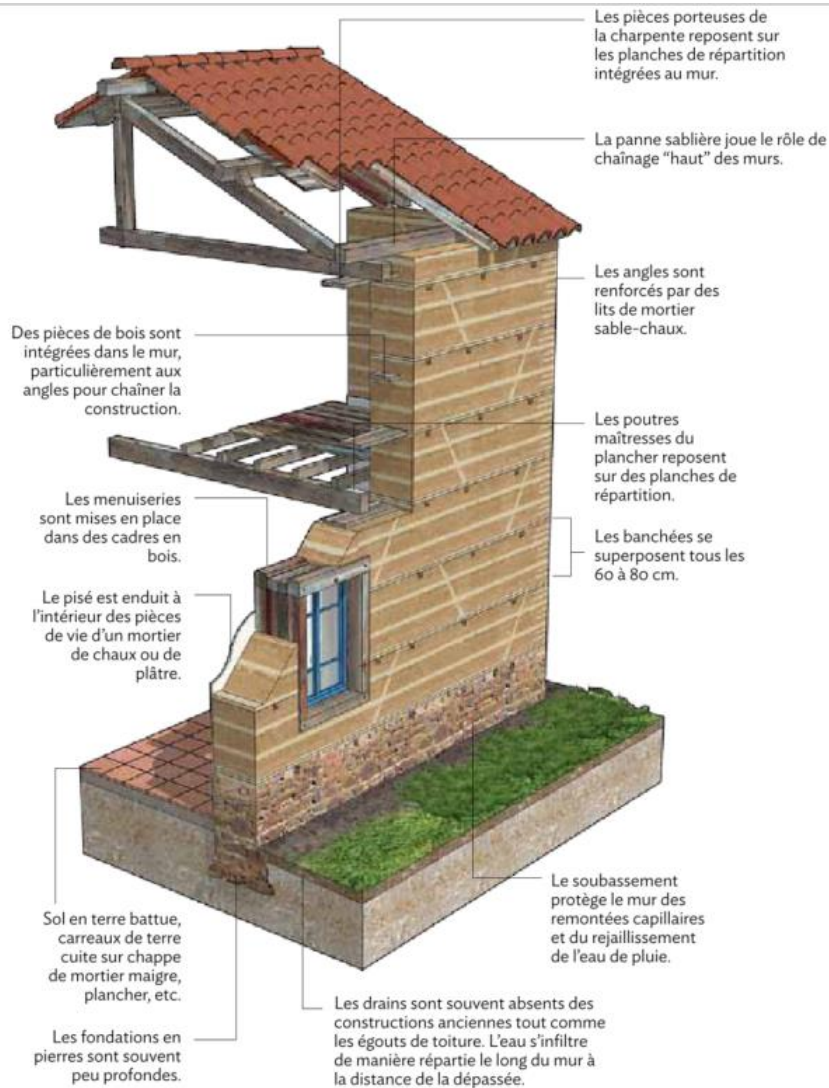


Figure 13 : Coupe axonométrique sur un bâti en pisé traditionnel, dessins : Arnaud Misse, source : réhabiliter le pisé, auteurs ; Sébastien Moriset, Joffroy Thierry, Mathilde Beguin, Hubert Guillaud, Martin Pointet, Misse Arnaud, CRAterre

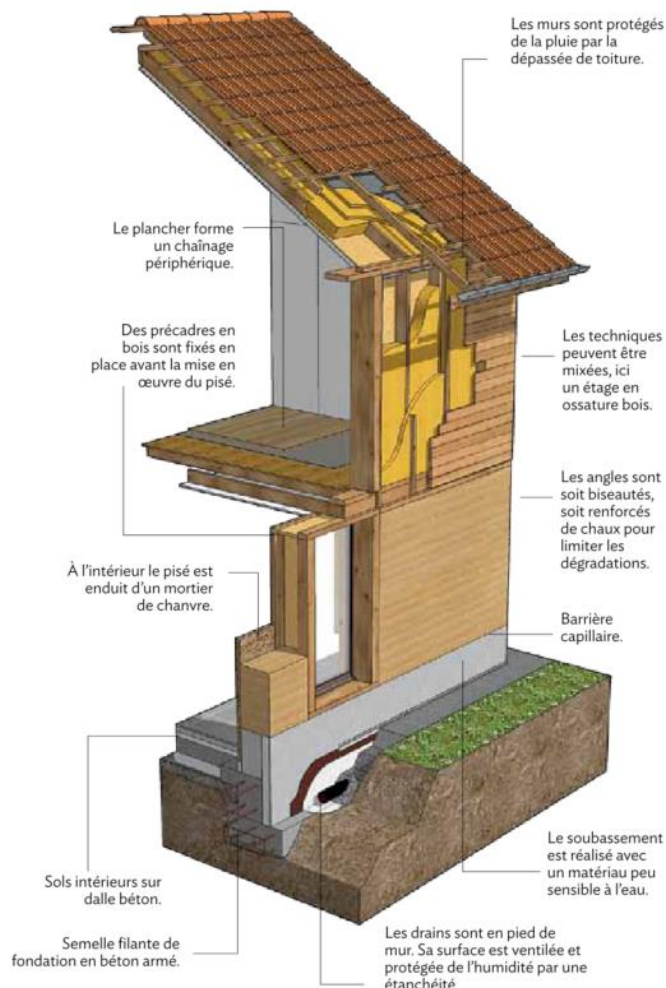


Figure 14 Coupe axonométrique sur un bâti en pisé contemporain, dessins : Arnaud Misse, source : réhabiliter le pisé, auteurs ; Sébastien Moriset, Joffroy Thierry, Mathilde Beguin, Hubert Guillaud, Martin Pointet., Misse Arnaud, CRAterre

Construction contemporaine en pisé

Dans le cadre d'un projet contemporain, la problématique de séchage du mur en pisé réalisé est à prendre en compte. En effet, le pisé va rejeter de l'humidité pendant toute la durée du séchage. De ce fait, les isolants sensibles à l'humidité ne peuvent être mis en œuvre qu'après séchage complet du mur en pisé contemporain. A l'inverse du bâti ancien, le pisé contemporain est doté d'une rupture capillaire mis en place au-dessus du sous-bassement, les risques liés aux remontées capillaires sont donc amoindris.

Pour les projets de pisé contemporains, on retrouve généralement la volonté forte de conserver le pisé visible depuis l'extérieur, pour des raisons esthétiques, mais aussi pour « montrer » ce qu'il est possible de réaliser avec le matériau terre crue aujourd'hui et redorer l'image de ce matériau afin de permettre sa diffusion.

A contrario du bâti ancien (composé exclusivement de parois en pisé), le bâti contemporain est souvent composé uniquement de certaines façades en pisé (pour des questions de coût et de logique de performance globale). En effet, dans le document « l'isolation du pisé », il est souligné que « *La question de l'isolation du pisé doit être précédée par un questionnement sur le fonctionnement thermique global de la construction. Dans le cas d'une construction neuve, il convient de favoriser une bonne conception de l'habitation : en situant les pièces principales au Sud et secondaires au Nord, profitant avantageusement des apports solaires ; en utilisant le pisé où il est le plus avantageux et un matériau mixte ailleurs* »¹⁷.

Les structures en pisé contemporain sont souvent moins compactes que le bâti traditionnel et présentent de grandes ouvertures. Le pisé n'est disposé que sur certaines façades. Il existe nombre de bâtiments en pisé contemporain de grande envergure (grands bâtiments d'entreprise ou en marché public), et les logiques d'usage sont donc différentes pour ces bâtiments que pour un bâtiment d'habitation, par exemple.

On retrouve par ailleurs la coupe axonométrique suivante dans l'ouvrage « réhabiliter le pisé »¹⁸ concernant le bâti contemporain en pisé.

Le cas particulier des murs capteurs d'énergie

Comme indiqué dans l'ouvrage « réhabiliter le pisé », les murs peuvent être utilisés comme « mur-masse » sans isolant au Sud notamment. Dans les projets de construction contemporains en pisé ou en rénovation de bâti ancien, on note parfois le choix de ne pas isoler un ou plusieurs murs afin de récupérer les apports du solaire passif à l'intérieur de l'habitat. Si l'on veut optimiser ce principe, il est également possible de réaliser un mur trombe ; un mur plein en pisé doublé d'un vitrage extérieur. En effet, le doublage du mur en pisé par un vitrage extérieur va créer un effet de serre, et la chaleur sera stockée dans la masse du mur en pisé en question. L'implantation d'un tel mur au sud permet de maximiser les apports thermiques dans la masse du pisé.

Le projet de DEHLINGEN avec Nunc Architectes est un bel exemple d'utilisation du pisé dans une fonction de mur trombe. Le pignon sud de ce projet est doublé d'une paroi vitrée pour former un système de chauffage solaire passif. L'air chauffé par le soleil entre le rideau de verre et le pisé tempère les salles du musée.

¹⁷ Heitz and others.

¹⁸ Moriset and others.

D. Enjeux isolation thermique par l'intérieur (ITI) / isolation thermique par l'extérieur (ITE) sur mur en pisé

Pour isoler un mur en terre crue, deux possibilités sont à envisager : l'isolation par l'extérieur et l'isolation par l'intérieur. Les ouvrages « réhabiliter le pisé »¹⁹, « construire en terre crue »²⁰, le document créé par ATELIER ALP²¹ et le document « migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien »²², donnent un panel d'arguments afin de comparer les avantages et inconvénients de ces différentes techniques d'isolation. Ci-après, est proposé un condensé des éléments à retenir à ce sujet.

L'isolation thermique par l'intérieur

Inconvénients :

- Avec l'ITI, il est difficile de traiter tous les ponts thermiques. Cela augmente les risques de condensation, notamment au droit des ponts thermiques, ce qui constitue un risque pour les matériaux putrescibles (bois, bio et géo sourcées en particulier). De plus, plus l'ITI est épaisse, plus il y a un risque de point de rosée dans l'isolant.
- Avec l'ITI, on met la paroi du côté froid, la paroi est donc plus exposée aux risques de condensation et au gel. Pour pallier au risque de condensation, cette technique nécessite souvent la mise en place d'un frein-vapeur. Cependant, le frein-vapeur ne permet pas de maintenir une continuité capillaire ; l'eau sous forme liquide présente dans le mur aura donc plus de mal à être évacuée. Pour

éviter de mettre en place un frein-vapeur, il est possible de ne réaliser qu'un « correcteur thermique » (faible isolation) du côté intérieur, mais cette solution ne permet pas d'avoir une isolation dite « performante ».

- L'ITI réduit la surface habitable et est plus gênante pour les habitants dans le cadre d'une rénovation en site occupé.
- Une isolation par l'intérieur fait perdre tout ou partie des bénéfices liés à l'inertie thermique du mur en pisé, car il n'est plus en contact avec l'ambiance intérieure.
- Lorsque les façades sont exposées aux intempéries, plus l'isolant intérieur est épais, plus il empêche le mur de chauffer. Or, les murs mouillés par la pluie sèchent plus vite s'ils sont chauds. Après la mise en place d'un isolant intérieur contre un mur en pisé, par exemple, ce dernier est soumis plus longtemps à l'humidité et met plus longtemps à sécher.

Avantages :

- L'ITI permet de préserver l'aspect extérieur des murs en pisé, ce qui est fondamental lors de l'intervention sur du patrimoine notamment.
- Ce procédé d'isolation est généralement moins cher que l'ITE, et sa mise en œuvre est souvent simplifiée (pas besoin d'échafaudage notamment).
- Permet de traiter l'isolation thermique d'un bâtiment lorsque l'ITE ne peut pas être réalisée (maison mitoyenne, alignement sur la rue ...).
- Permet l'installation des réseaux sans avoir à tailler les murs.

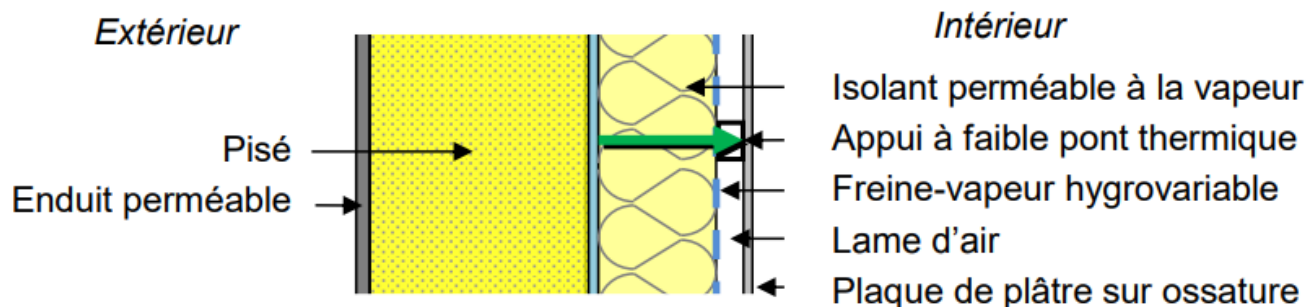


Figure 15 : ITI d'un mur en pisé, Source : Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, Auteur : Eneritech

¹⁹ Moriset and others.

²⁰ Ulrich Röhlen and Christof Ziegert, 'Construire En Terre Crue', Groupe Moniteur, Éditions Du Moniteur, Paris, France, 2013.

²¹ Atelier ALP, 'Isoler Un Mur En Pisé'.

²² ENERTECH SCOP, 'Migration d'humidité et de vapeur dans les parois du bâti ancien', 2017

Pour une isolation par l'intérieur, il semble primordial d'utiliser un isolant perméable à la vapeur d'eau afin de ne pas créer de point de blocage de l'humidité entre le mur en terre et l'isolant, et ainsi éviter l'apparition de points de condensation et de pathologies.

De même, il est primordial de mettre en œuvre un isolant capillaire, afin de ne pas créer de « blocage » de migration d'eau sous forme liquide dans le mur. L'eau peut provenir du sol par remontée capillaire, des pluies battantes contre le mur extérieur, ou encore d'un point de rosée dans le mur. Avec une continuité capillaire, l'eau sera évacuée du côté humide vers le côté sec du matériau. Il est donc préférable de ne pas laisser de vide entre l'isolant et le mur (sauf si un risque de condensation est mis en avant lors des études thermiques), afin de garantir une continuité de transfert, notamment en ce qui concerne la migration d'eau sous forme liquide. Il est préférable d'avoir recours à des isolants qui épousent parfaitement les aspérités de la paroi afin qu'aucune lame d'air ne soit créée entre l'isolant et le mur en pisé.

Comme mentionné dans l'ouvrage « construire en terre crue »²³, dans le cas d'une isolation conséquente par l'intérieur, il faut vérifier que le complexe mis en œuvre ne laisse pas apparaître de point de rosée dans la paroi (méthode de GLASER, simulation thermique statique). Pour prévenir le phénomène de condensation, il est recommandé de mettre en place un pare-vapeur hygro-variable afin de limiter la pénétration de vapeur d'eau dans le mur. Cependant, la mise en place d'un tel matériau limite la régulation hygrométrique du pisé.

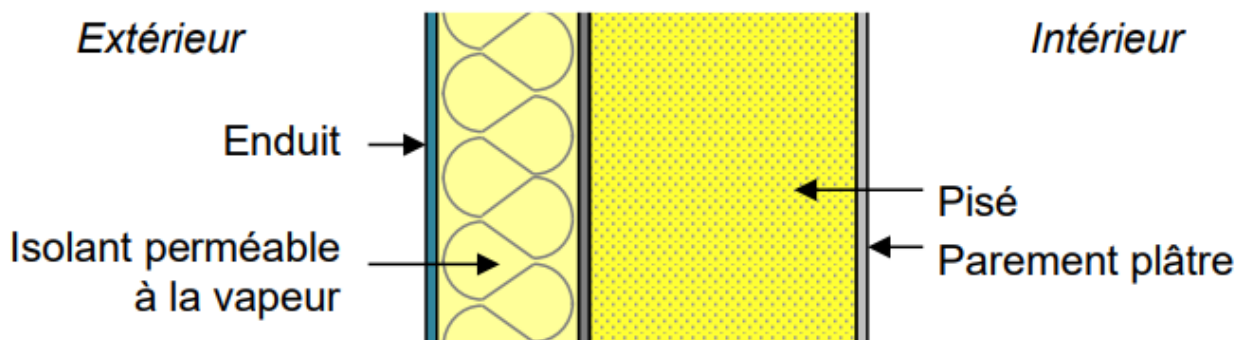


Figure 16 : Isolation par l'extérieur d'un mur en pisé, source : migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, Auteur : Eneritech

L'isolation par l'extérieur

Inconvénients

- L'ITE ne permet pas de conserver l'aspect extérieur des murs en pisé.
- Elle est souvent refusée dans les périmètres de protection des monuments historiques et sur les bâtiments présentant un intérêt patrimonial. Certaines contraintes urbanistiques peuvent également interdire l'ITE (trottoirs étroits par exemple).
- Très peu d'exemples de réalisation et donc peu de retours d'expérience.
- Plus coûteuse, et des traitements particuliers doivent être apportés au niveau des ouvertures. Cependant, ce point reste à étudier au cas par cas. En effet, dans le cas d'une maison où de toute façon une réfection de façade est à prévoir, l'ITE peut s'avérer plus économique.

Avantages

- Un mur isolé par l'extérieur devient plus chaud en hiver. Il est totalement protégé du gel et de la pluie. Du point de vue de la migration de l'humidité, l'ITE protège mieux le bâti en pisé.
- L'ITE permet de traiter l'intégralité des ponts thermiques (refends et planchers intermédiaires).
- Le mur en terre est conservé du côté « chaud » de l'habitation, donc les risques de condensation sont diminués.
- L'ITE permet de profiter pleinement de l'inertie des murs en pisé. En effet, la surface des murs intérieurs en terre crue prévus pour agir comme masse reste en contact avec l'air intérieur et permet de

²³ Röhlen and Ziegert.

stocker de la chaleur en hiver et de la fraîcheur en été.

- L'ITE permet d'isoler une maison tout en étant en site occupé.
- Elle permet une isolation très performante de l'habitat ; possibilité de mettre des épaisseurs conséquentes d'isolant sans diminuer la surface habitable intérieure.

Conseil de mise en œuvre

De même que pour l'ITI, l'isolant mis en place doit être perméable à la vapeur d'eau et capillaire, et être mis en œuvre sans lame d'air contre le matériau pisé.

En cas d'isolant collé contre la façade, il faut purger le mur et reprendre les aspérités de la façade pour éviter l'apparition de vide entre isolant et le mur en terre crue (continuité capillaire). En cas d'isolant vrac insufflé, ou d'une mise en œuvre projetée ou banchée de type béton végétal, il n'est pas nécessaire d'avoir une surface de mur plane, car ce dernier peut épouser la forme de la paroi et ses aspérités.

L'ITE mise en œuvre doit permettre soit l'application d'un enduit extérieur perméable à la vapeur d'eau (enduit chaux), soit la mise en œuvre d'un parement extérieur afin de protéger l'isolation de la pluie.

Un des points de vigilance majeurs de l'ITE est le traitement de l'isolation en pied de mur et les éventuels ponts thermiques au sol. Une étude au cas par cas doit être réalisée afin de définir le dispositif le plus adéquat (isolant imputrescible à mettre en œuvre au contact du sol).

L'étude HYGROBA

L'étude HYGROBA²⁴ présente un volet complet sur l'isolation du pisé. L'étude de plusieurs configurations a permis d'établir un tableau afin de visualiser les possibilités d'isolation pertinentes sur un mur en pisé.

Un tableau de synthèse de l'étude est présent à l'annexe n° 5 du présent document. Dans les complexes présentés la lettre « P » signifie perméable à la vapeur d'eau et la lettre « E » signifie étanche à la vapeur d'eau.

Ce tableau montre que, du point de vue hygrothermique, l'isolation par l'extérieur est préférable à l'isolation par l'intérieur (inertie de paroi conservée, risque de condensation faible, quantité d'eau présente dans le pisé plus faible, capacité de séchage en présence d'infiltration d'humidité est plus importante). Parmi les solutions d'ITE, seuls les complexes perméables à la vapeur d'eau sont pertinents.



Figure 17 : étude HYGROBA

Récapitulatif

L'isolation de bâtiment par l'extérieur est une solution plus performante thermiquement, et elle permet de réduire le risque de condensation dans la paroi. C'est pourquoi la suite de ce mémoire se focalisera exclusivement sur les solutions techniques apportées par l'ITE pour isoler un mur en pisé.

²⁴ Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes : HYGROBA, ed. by Centre d'études techniques de l'équipement (Metz) and

others (CETE de l'Est LRA LMDC Maisons Paysannes de France, 2013).

2. MATERIAUX ET DISPOSITIFS TECHNIQUES POUR ISOLER UN MUR EN PISE PAR L'EXTERIEUR

A. Qu'est-ce qu'un isolant bio et/ou géo sourcé ?

Selon le ministère de la transition écologique²⁵, la définition du terme « produits biosourcés » désigne des produits partiellement ou entièrement issus de biomasse. Le préfixe « bio » (issu du vivant) ne signifie pas que la matière biosourcée est issue de l'agriculture biologique, ni qu'elle est forcément biodégradable. Concernant les matériaux « géosourcés », ils représentent les matériaux issus de ressources d'origine minérale, tels que la terre crue ou la pierre sèche. En complément à ces premières définitions, on trouve dans le guide de l'ADEME²⁶ la définition suivante pour les « produits biosourcés » : un produit biosourcé est un produit partiellement ou entièrement issu de matières végétales ou animales, de champignons ou encore de bactéries,

Les isolants bio et/ou géo sourcés sont issus de ressources renouvelables, leur utilisation contribue à la préservation des ressources naturelles. De plus, le mélange d'une fibre biosourcée à un liant géosourcé permet d'obtenir un isolant bio-géosourcé.

Comme ils sont soumis à peu de transformations, ils ont l'avantage d'émettre moins de gaz à effet de serre que les matériaux plus conventionnels²⁷. Grâce à cela, leur cycle de vie est plutôt favorable pour l'environnement,

d'autant plus que certains de ces matériaux peuvent stocker du carbone. Cependant, ils ne peuvent pas toujours être considérés comme naturels (issu de la nature sans transformation). Il est en effet possible qu'ils aient subi une transformation, un traitement, et qu'ils contiennent des additifs chimiques. Ils peuvent également avoir parcouru de grandes distances lors de leur transport. **Pour minimiser d'avantage l'impact écologique de la construction, il semble nécessaire de privilégier les matériaux bio et/ou géo sourcés de proximité avec le moins de transformation possible.**

Les phénomènes physiques liés aux matériaux en terre crue induisent une attention particulière à porter lors du choix de l'isolant. En effet, « Comparé à d'autres matériaux utilisés pour des éléments porteurs, le pisé est un matériau qui permet un transfert de vapeur d'eau important. Mais si cette vapeur d'eau est bloquée par un matériau étanche sur une des faces, elle peut se condenser dans le pisé et conduire à une perte importante des propriétés mécaniques du mur. L'utilisation d'isolants étanches à la vapeur d'eau est donc contre-indiquée »²⁸. La plupart des matériaux bio et/ou géo-sourcés sont quant à eux, à la fois capillaires et perméables (voir annexe n° 7). Ces matériaux, couplés au mur en pisé, permettront donc une bonne régulation hygrométrique.

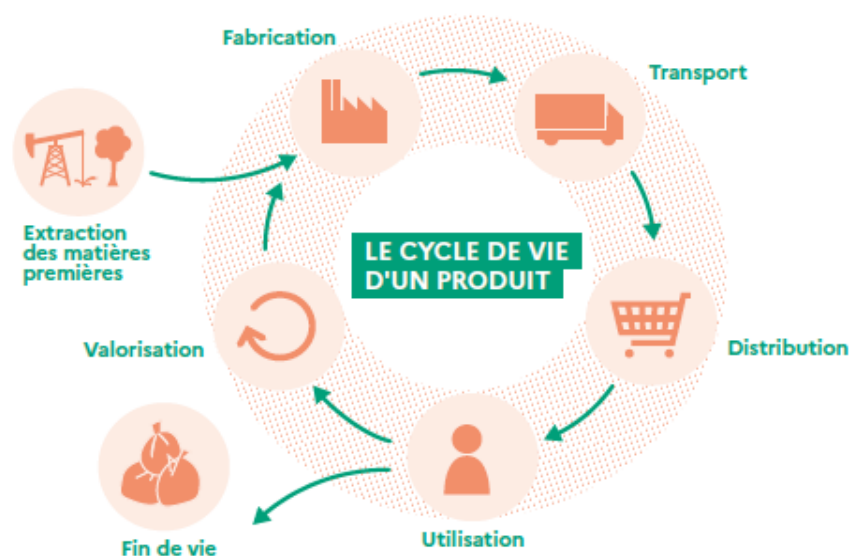


Figure 18 : Analyse de cycle de vie des produits biosourcés - Illustration ADEME, document « les produits biosourcés en 10 questions »

²⁵ Ministère de la transition écologique, 'Les Matériaux de Construction Biosourcés et Géosourcés'.

²⁶ ADEME, 'Les produits biosourcés en 10 questions'

²⁷ ADEME, 'Les produits biosourcés en 10 questions'.

²⁸ AIA life designers and Ekopolis, 'Mieux concevoir et construire en terre crue : collection « Construire autrement »', 2023.

B. Les isolants biosourcés

Il existe une multitude d'isolants qui répondent aux exigences bio et/ou géo sourcés : les produits dérivés du bois, La paille, les produits dérivés du chanvre, la ouate de cellulose, le liège, la laine de mouton, le lin, les balles de céréales, le colza, le tournesol, l'ortie, le roseau, le chaume, la plume de canard et d'oie, la laine de coton, la fibre de coco, le miscanthus, les produits géosourcés tels que la terre crue et la pierre, la perlite, la chaux, ainsi que les produits recyclés comme l'isolant en textile recyclé. Dans certains cas, les matériaux sont encore à un stade expérimental ou peu développé.

A titre comparatif, le Cerema a édité un tableau ²⁹ répertoriant les caractéristiques physiques et hygrothermiques des principaux matériaux isolants conventionnels ainsi que bio et/ou géo sourcés (annexe n°8).

De même, une Etude de « La maison écologique »³⁰, l'ouvrage « Mieux concevoir et construire en terre crue »³¹ ainsi que les guides « Les matériaux biosourcés dans le bâtiment »³² et « Le coût des matériaux biosourcés dans la construction »³³ référencent les caractéristiques de ces différents isolants.

Pour les principaux matériaux isolants biosourcés, leurs caractéristiques sont recensées dans des tableaux présents en annexe 9 à 16 de ce mémoire. Suite à la mise en place de ces tableaux de caractéristiques, une analyse a été réalisée par isolant (annexe 9 à 16) selon les critères suivants :

- Caractéristique du matériau et compatibilité avec le couplage isolant/pisé
- Critère économique
- Critère écologique
- Qualité/ durabilité du matériau
- Continuité entre mur existant en pisé et nouvel isolant
- Capacité à recevoir directement un enduit

- Epaisseur du complexe final pour atteindre une résistance thermique satisfaisante
- Règlementation existante pour la mise en œuvre du matériau
- Facilité de mise en œuvre
- Performances acoustiques et résistance au feu du matériau
- Provenance de la ressource ; produit industrialisé/ transformé/ disponibilité de la ressource
- Enfin, on retrouve par la suite de ce mémoire les caractéristiques spécifiques prédominantes pour ces matériaux.



Figure 19 : Les matériaux biosourcés, source : Obat

²⁹ Héberlé.

³⁰ La maison écologique, 'Tableau Comparatif Des Isolants' (La maison écologique, 2015).

³¹ AIA life designers and Ekopolis.

³² Ministère de la transition écologique.

³³ Cerema Ouest, 'Le coût des matériaux biosourcés dans la construction : Etat de la connaissance (2016)' (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie).

Isolants en bois

Origine : La fibre de bois est obtenue à partir de sciure de bois, copeaux et autres déchets de l'industrie du bois. Ces matériaux sont broyés puis soumis à un processus de défibrage pour obtenir des fibres fines. Ensuite, ces fibres sont mélangées avec un liant naturel fibreux ou liquide (ciment ou résine végétale), pour assurer la tenue mécanique. Quant à la laine de bois, c'est un produit fabriqué à partir de longs copeaux de bois issus d'un processus de rabotage. Le fabricant de laine de bois mélange la laine à un liant minéral (combinaison de ciment et de chaux), puis elle est moulée selon l'épaisseur d'isolant souhaitée, par procédé humide.

Avantages/ inconvénients des caractéristiques génériques du matériau :

Avantages : Bon déphasage. Coût moyen. Inconvénients : Impact écologique plutôt élevé en comparaison aux autres biosourcés.

Produits et caractéristiques spécifiques :

- **Laine de bois**
- **Panneaux de fibre de bois** : Capacité à recevoir directement un enduit
- **Fibre de bois en vrac** : Sous sa forme insufflée, épouse parfaitement la paroi isolée

Isolants en liège

Origine : La production de matériaux de construction à base de liège est principalement réalisée grâce à l'écorce du chêne-liège ou par le recyclage des bouchons. La quasi-totalité des produits de liège pour la construction en France est importée.

Avantages/ inconvénients des caractéristiques génériques du matériau :

Avantages : caractère imputrescible et peu altérable.

Inconvénients : Fermé à la vapeur d'eau/ non capillaire.

Produits et caractéristiques spécifiques :

- **Liège en vrac**
- **Panneaux de liège** : Facilement mis en œuvre pour isoler les sous-basements.

Isolants en Paille

Origine : La paille d'orge, de blé, du triticale... est aujourd'hui valorisable sous différentes formes et nécessite aucune transformation. Ce matériau est largement disponible de façon abondante sur le territoire français.

Avantages/ inconvénients des caractéristiques génériques du matériau :

Avantages : Analyse de cycle de vie peu impactante.

Produits et caractéristiques spécifiques :

- **Paille en Vrac** : Produit manufacturé par la SCOOP Ielo en France et utilisé pour la première fois en 2022 pour le projet du CROUS de Poitiers avec ATEX (selon Julien Cerri constructeur paille). Permet d'épouser la forme de la façade sans laisser de lame d'air.
- **Botte de paille** : Déchet ou co-produit agricole, non manufacturé. Avec la technique de mise en œuvre par bretelle, elle permet de se passer d'ossature. L'épaisseur de l'isolation est conséquente si non rebottelée (largeur d'une botte).
- **Panneaux rigides** : Produit manufacturé par la société Copano et confectionné par couture à sec et à froid, prêt à être enduit.

Isolants en Chanvre

Origine : Le chanvre est une plante à croissance rapide. On utilise les fibres extérieures de la plante pour réaliser la laine de chanvre, et la chènevotte est issue de l'intérieur de la tige. Les produits à base de chanvre sont transformés par un processus industriel ou en atelier.

Avantages/ inconvénients des caractéristiques génériques du matériau :

Avantages : Culture de la plante bénéfique pour le sol et exempte de pesticide. Forte capacité hygroscopique. Résiste relativement bien à l'humidité en comparaison aux autres matériaux biosourcés (bien qu'il reste tout de même sensible à l'eau).

Produits et caractéristiques spécifiques :

- **Chènevotte En vrac** : Impact environnemental faible. Co-produit agricole.
- **Laine de chanvre** : Produit manufacturé.

Isolants en Ouate de cellulose

Origine : La ouate de cellulose est produite à partir du recyclage du papier (journaux, déchets d'imprimerie). La ouate de cellulose pour la construction est fabriquée en usine (en France, il existe plusieurs fabricants).

Avantages/ inconvénients des caractéristiques génériques du matériau :

Avantages : Coût peu élevé. Faiblement inflammable.

Inconvénients : Dégage des poussières et des odeurs qui nécessitent un équipement particulier.

Produits et caractéristiques spécifiques :

- **Panneau en ouate de cellulose**
- **Ouate de cellulose en vrac** : Rapide à mettre en œuvre. Coût équivalent à une isolation « conventionnelle ». Epouse parfaitement la paroi sans laisser de lame d'air.

Isolants en textile recyclé

Origine : La production de matériaux de construction à base de textile recyclé est réalisée principalement grâce aux chutes de l'industrie textile et aux vêtements usagés des ménages qui sont rapportés dans des bennes de tri. Les tissus sont découpés, hachés et défibrés puis mélangés dans des proportions constantes de coton, laine et acrylique. Les fibres sont ensuite thermoliées avec du polyester pour former des rouleaux ou panneaux semi-rigides de densité variable. Le textile recyclé de construction est fabriqué en usine (en France, il existe plusieurs fabricants).

Avantages/ inconvénients des caractéristiques génériques du matériau :

Avantages : Plus léger que la ouate, permet donc de traiter en rénovation des zones où il n'est pas possible d'ajouter du poids.

Inconvénients : Coût plus élevé que la ouate de cellulose.

Produits et caractéristiques spécifiques :

- **Panneaux et rouleaux en coton recyclé**
- **Textile recyclé en vrac** : Temps d'insufflation plus long que pour la ouate de cellulose. Permet d'épouser la forme de la paroi sans laisser de vide d'air.

C. Les isolants bio-géo sourcés (chaux-chanvre et terre allégée)

La fabrication du « béton de chanvre » repose sur un mélange de trois composants : un granulat végétal (la chènevotte), un liant (la chaux) et de l'eau³⁴.

La terre allégée se compose d'environ 20% de terre associée à 80% de fibre végétale (paille, chanvre, copeaux de bois, lin, roseau broyé). Cette technique a notamment été développée par Franz Volhard³⁵. Les techniques les plus courantes en termes d'isolation sont les mélanges terre-paille et terre-chanvre. D'autres mélanges moins courants de terre allégée existent, comme le mélange « terre-copeaux de bois », « terre-balle de riz », ou encore, dans le cadre des travaux menés par CRAterre, « terre-typha »³⁶. Cette technique permet d'alléger le matériau terre pour en faire un matériau isolant avec une masse volumique de mur de l'ordre de 300 kg/m³.

Le comparatif des paramètres physiques et hygrothermiques des produits bio-géo sourcés se trouve en annexe n°16 du présent document.

Caractéristiques génériques des matériaux chaux-chanvre et terre allégée en comparaison aux isolants plus « conventionnels »

Avantages :

- Bonne isolation acoustique, bonne régulation thermique et hydrique, ainsi que résistance au feu. En effet, les annexes n° 8, 16 et 17 montrent que ces matériaux ont une masse volumique plus élevée que les isolants mis en œuvre par voie sèche, une capacité thermique volumique élevée et une très forte capacité hygroscopique. La mise en œuvre de ces matériaux permet donc d'augmenter l'inertie du mur (plus de stockage interne) et d'augmenter sa capacité à capter et à emmagasiner l'humidité.

³⁴ Construire en Chanvre, 'Règles Professionnelles d'exécution d'ouvrages En Bétons et Mortiers de Chanvre', SEBTP, SEBTP, Paris, France, 2012.

³⁵ Franz Volhard, *Construire En Terre Allégée* (Éditions Actes Sud, 2021).

- Ils permettent une continuité physique entre le pisé et l'isolant. En effet, un mur en pisé isolé en terre-allégée ou en chaux-chanvre agit comme un mur monolithique composé de plusieurs couches. Continuité thermique, hygroscopique et capillaire entre les différentes couches du complexe.
- Le chaux-chanvre et la terre allégée permettent de se passer d'un bardage par l'application d'un enduit à la chaux directement sur l'isolant.

Inconvénients :

- Leurs faibles conductivités nécessitent la mise en œuvre d'une couche d'isolant conséquente à résistance thermique égale en comparaison à un isolant plus conventionnel. Ces isolants peuvent être mis en œuvre sans limite d'épaisseur, à condition d'adapter l'ossature secondaire.
- Lors de la mise en œuvre, la température doit être comprise entre 8 et 25°C pour les mélanges à base de chaux et supérieure à 5°C pour les mélanges à base de terre. Il n'est donc pas possible de réaliser ces isolants en plein hiver.
- Un sous-bassement est nécessaire pour porter cet isolant.



Figure 20 : Réalisation de terre allégée aux grands ateliers dans le cadre des formations Amàco

³⁶ Lalaina Rakotomalala, *Terre-Typha. Construire en terre et en roseaux au Sénégal* (Grenoble: CRAterre-ENSAG, 2015).

Produits et caractéristiques spécifiques des isolants en chaux-chanvre

L'impact environnemental du chaux-chanvre est supérieur à celui de la terre allégée, notamment en raison de l'utilisation du liant « chaux ».

Les produits réalisés avec le chaux-chanvre

- **Blocs de chaux-chanvre préfabriqués :** Certains producteurs proposent le produit à la vente. Il s'agit d'un matériau sec à la mise en œuvre, avec une densité maîtrisée. Il est important de prêter attention à la mise en œuvre pour éviter l'apparition d'une lame d'air derrière la brique.
- **Chaux-chanvre projeté :** Cette méthode offre **une** rapidité d'intervention, nécessite un temps de séchage et demande un équipement spécifique.
- **Chaux-chanvre banché :** Ce produit a une densité plus élevée, nécessite un temps de séchage et présente un risque lié à l'apparition de moisissure.



Figure 21 : Chaux-chanvre en isolation extérieure,
Source : site internet de Arbio.ch

Produits et caractéristiques spécifiques des isolants en terre allégée

L'impact ACV est exemplaire et la terre allégée permet la revalorisation des terres excavées. Toutefois, cette technique nécessite une connaissance spécifique pour analyser la terre de site afin de la valoriser.

La terre allégée permet une parfaite continuité avec le pisé, avec des liaisons argileuses possibles entre la terre allégée et le pisé.

Il s'agit d'une technique peu développée qui reste souvent expérimentale.

Une grande attention doit être portée au séchage du matériau. En effet, le séchage est l'un des principaux points d'attention avec la terre allégée, comme indiqué dans le livre de Franz Volhard³⁷ ; lorsque le séchage est retardé et que la teneur en eau se maintient à plus de 20%, des champignons peuvent apparaître et disparaître au fur et à mesure du processus de séchage. Cette formation temporaire de moisissure n'est pas inquiétante si l'on s'assure que la construction une fois sèche le reste.

Les produits réalisés avec la terre allégée

- **Terre allégée banchée :** Présente une densité plus élevée, un temps de séchage à prendre en compte et un risque de moisissure (durant la phase de séchage).
- **Terre allégée projetée :** Cette technique est possible avec le chanvre et avec la paille, à condition que cette dernière soit broyée. Elle offre une rapidité d'intervention, mais demande un équipement spécifique. Une phase de séchage est à observer.
- **Briques de terre allégée préfabriquées :** A ce jour, il n'existe pas de briques de terre allégée disponibles à la vente en France. Cependant, la société « ISOL' en paille » réalise des premiers essais pour fournir des bottes de terre-paille prêtes à l'emploi. Ce produit est en voie de développement et pourrait bientôt être commercialisé. Il s'agit d'un matériau sec à la mise en œuvre, avec une densité maîtrisée.

³⁷ Volhard.

D. Les dispositifs constructifs en ITE

Modes opératoires

Les isolants biosourcés peuvent être mis en œuvre par voie sèche sous différentes formes (insufflés, déroulés, assemblés, collés). Pour le cas particulier de la ouate de cellulose, il est également possible de la mettre en œuvre par voie humide projetée. Quant aux isolants bio-géo sourcés, ils sont mis en œuvre par voie humide sous différentes formes également (projetés, tassés) ou par voie sèche en cas de préfabrication (assemblés, collés).

Les principes constructifs en ITE

Les dispositifs constructifs en ITE sont divisés en 7 catégories :

- Isolants insufflés
- Panneaux de laine végétale
- Panneaux rigides à forte densité
- Bottes de paille
- Isolants végétaux à projeter
- Isolants végétaux à bancher
- Blocs préfabriqués

On retrouve l'intégralité des principes constructifs existant en ITE ainsi que le descriptif des dispositifs techniques pour chaque principe constructif en annexe n°24 et 25 de ce mémoire.

Remarques, avantages et inconvénients des différents systèmes constructifs

- La projection ou l'insufflation (n°1 et 5) permet un gain de temps et permet d'épouser parfaitement la forme du mur à isoler.
- La projection ou l'insufflation (n°1 et 5) n'est pas adaptée à l'auto construction car demande d'être équipé d'une machine spécifique. La mise en œuvre entre banche l'est.
- La préfabrication (n°7) ne permet pas toujours d'épouser la forme du mur en réhabilitation.
- L'isolation collée avec les panneaux rigides à forte densité, les blocs préfabriqués chaux-chanvre ou encore la mise en œuvre des bottes de paille par le système de bretelle, permettent de se passer d'une ossature secondaire (économie de matière) ainsi qu'une facilité de mise en œuvre et offrent une solution par voie sèche assez rapide qui

ne nécessite pas de machine spécifique sur le chantier.

- L'ensemble des mises en œuvre (mis à part l'isolation collée) nécessite une ossature secondaire. Cela signifie la création d'une fondation ou des reprises sur la structure existante.
- Peu importe le système constructif, un diagnostic doit être réalisé en réhabilitation ainsi qu'un décroustage de l'enduit ciment si existant.

E. Réglementation et référentiels de technique courante

L'appellation « technique courante » est établie par les assureurs, différenciant les travaux normalement garantis de ceux qui nécessitent une déclaration préalable. Généralement, les techniques courantes concernent les travaux décrits par les DTU, les normes ou les règles de l'art, les règles professionnelles acceptées par la C2P et les avis techniques et DTA³⁸. Le tableau annexe 23 répertorie les différents textes reconnus par la profession et bénéficiant d'une assurabilité en tant que technique courante. Pour les autres techniques, il sera nécessaire de réaliser une analyse de risques plus poussée fondée sur la destination des ouvrages et sur les références existantes.

Pour les panneaux manufacturés de laine, de fibres rigides ou pour le vrac vendu dans le commerce, il existe des avis techniques selon les produits et les fabricants³⁹, ainsi qu'une labélisation ACERMI.

Concernant les produits non manufacturés,

La RFCP travaille à la rédaction de règles professionnelles pour l'isolation extérieure en bottes de paille. Ces dernières devraient paraître d'ici un an et demi, selon Julien Cerri (constructeur paille et rédacteur des règles professionnelles⁴⁰).

Pour le béton de chanvre, les règles professionnelles permettent de le classer en technique courante. La connaissance et le suivi des règles professionnelles d'exécution contribuent à l'assurabilité de la construction à base de mortiers et bétons de chanvre. La dernière édition des règles professionnelles date de 2012 et fait actuellement l'objet d'un suivi précis⁴¹.

Quant aux ITE de terres allégées, elles ne sont pas encore régies par une règle professionnelle permettant de les classer en technique

courante. Il existe cependant un guide des bonnes pratiques⁴² publié en 2019, qui ne permet pas de classer la technique en technique courante, mais qui est un premier pas vers une réglementation future. De plus, le livre de Franz Volhard⁴³ peut servir de support pour la montée en compétence sur cette technique, recoupant la plupart des informations essentielles pour construire en terre allégée.

On note ici l'évolution différente des filières paille, béton de chaux et terre. La variabilité de la ressource en terre est un des principaux freins à la rédaction de règles professionnelles. Avec les nombreux travaux réalisés par CRAterre, par les associations régionales rédactrices des guides des bonnes pratiques, ou encore par les chercheurs en université, le matériau terre crue et de mieux en mieux connu, et on remarque une augmentation du déploiement de ces techniques de construction en terre sur le territoire français ces dernières années. En rassemblant des praticiens et des chercheurs, le projet national terre, initié en 2017, permet de cibler les recherches scientifiques en s'inspirant directement des besoins qui émanent du terrain. Cette mutualisation des efforts de la filière terre crue pourrait porter ses fruits et permettre à long terme d'inscrire la construction terre en technique courante.

« Dans la continuité du travail initié avec les guides des bonnes pratiques, il est nécessaire de développer des outils de dimensionnement, de conception, de mise en œuvre et de formation à destination des bureaux d'études et des contrôleurs techniques, en lien étroit avec les assureurs. Les travaux du projet national pourront alimenter les guides de bonnes pratiques et, le cas échéant, les faire évoluer vers des documents validés par la Commission Prévention Produits de l'AQC⁴⁴ ». PNTerre

³⁸ APAVE and Envirobat, 'Guide technique des matériaux biosourcés & géosourcés à l'usage des acteurs de la construction - Le regard du contrôleur technique'.

³⁹ CSTB, 'Rechercher un produit évalué', CSTB Évaluation.

⁴⁰ Réseau Français de la construction en paille RFCP, *Règles professionnelles construction en paille : remplissage isolant et support d'enduit, règles CP 2012 révisées*.

⁴¹ Quentin Pichon, Jean-marc Naumovic, and Construire en chanvre, *Construire en chanvre : règles professionnelles d'exécution* (Paris : SEBTP, 2012).

⁴² *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue*, ed. by ARESO and others, 2018.

⁴³ Volhard.

⁴⁴ PNTERRE, 'PNTERRE objectifs', 2023.

3. ETUDES DE CAS : ISOLATION THERMIQUE PAR L'EXTERIEUR AVEC DES ISOLANTS BIO-GEO SOURCES



Projet d'isolation d'une maison en pisé avec de la ouate de cellulose projetée,

Crédits photos : CARACOL

A travers l'analyse de projets, l'objectif de cette étude est d'avoir une vision globale de la pratique professionnelle actuelle, des isolants mis en œuvre, et de répertorier les assemblages (ossature secondaire, collage, etc.) réalisés sur le terrain dans le cadre d'une ITE en bio-géo sourcé.

L'analyse des projets permettra de dégager les complexes isolants bio-géo sourcés qui semblent les plus pertinents (selon des critères choisis) dans le cas d'une isolation de mur en pisé par l'extérieur, pour du neuf et pour de la réhabilitation. Il s'agit en effet, de repérer les complexes bio-géo sourcés qui pourront être étudiés par la suite, dans le cadre de ma future thèse, en examinant différentes typologies d'assemblages, pour des projets contemporains et pour des projets en rénovation.

L'étude se base sur l'analyse de photos, de plans, de détails de mise en œuvre, ainsi que, chaque fois que cela a été possible, sur des entretiens et échanges de mails avec les architectes, bureaux d'études, artisans intervenants sur les projets étudiés.

Pour chaque projet, il s'agit dans un premier temps d'expliquer les choix effectués et ce qui a pu les orienter, de souligner les contraintes du projet et de la mise en œuvre, ainsi que de dégager les avantages et les inconvénients des différents complexes isolants.

Une analyse finale et globale, présentée dans la partie 4 de ce mémoire, et basée sur les critères suivants, permettra de conclure sur la pertinence des ITE mises en œuvre :

- Critères de matérialité (aspect esthétique)
- Critères d'impact environnemental
- Critères liés au matériau et à la continuité physique avec le pisé
- Critères de mise en œuvre : épaisseur, ossature, complexité de mise en œuvre, Temps de mise en œuvre, Temps de séchage et coût

Le corpus de projet analysé est divisé en trois catégories. Une première catégorie recense les projets d'ITE réalisés dans le cadre d'une réhabilitation de murs en pisé. La seconde catégorie répertorie des projets d'ITE réalisés sur des murs en terre pour des bâtiments neufs, tandis que la troisième partie recense des complexes isolants bio-géo sourcés pouvant présenter un intérêt dans le cadre d'une isolation de murs en pisé.

Tableau 1 ; Corpus de projets analysés

TYPLOGIE	PROJETS	ISOLANTS	PAGES
ITE Réhabilitati on pisé	Rénovation d'une ancienne ferme en pierre et pisé	Laine de bois et fibre de bois	P 34-35
	Rénovation d'une maison en pisé	Demi-botte de paille	P36-37
	Reconversion d'une grange en pisé en loft d'habitation	Ouate de cellulose insufflée	P38-39
	Réhabilitation d'une bâtisse en pisé	Panneaux de roseaux collés	P4-41
ITE sur mur contemporain en terre	Projet le foyer	Pisé / Chaux-Chanvre projeté	P42-43-44
	Alnatura corporate campus	Pisé / Galets de verre cellulaire	P45-46
	Projet carré flore	BTC / Laine de bois et fibre de bois	P47
	Projet cob bauge	Bauge/ Terre allégée	P48-49
D'autres exemples d'ITE en bio-géo sourcés	Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen	Pisé/ Liège	P50-51
	Collège innovant de Béthoncourt	Terre-chanvre projeté	P52-53
	Projet la gaité	Panneaux de paille fissés	P54-55
	Projet « la recette »	Chaux-Chanvre banché	P56-57
	Rénovation d'une maison	Blocs chaux-chanvre préfabriqués collés	P58

A. Réhabilitation de mur en pisé isolé par l'extérieur

Rénovation d'une ancienne ferme en pierre et pisé – isolation laine de bois/fibre de bois⁴⁵

Tableau 2 : Caractéristiques projet isolation laine bois

Projet	Rénovation d'une ancienne ferme en pierre et pisé ⁴⁶
Usage	Habitation
Lieu	Brullioles (69)
Date du bâtiment	1800-1900
Architecte/ maître d'œuvre	Domébio
Entreprise d'isolation	Biofrance isolation
Propriétaire	Damien Bouilly particulier
Date du chantier	2016
Nature des murs en terre crue	Pisé
Nature des enduits existants	Ciment décroulé au début du chantier
Remarques spécifiques à la réhabilitation	Niveau BBC rénovation
Quels murs isolés	Façades Nord et Nord-Est isolées. Serre bioclimatique au sud avec enduit de correction thermique en terre-paille/chaux.
Type d'isolation	Couches croisés : Laine de bois (10cm) dans ossature bois secondaire + fibre de bois rigide (6cm)
Isolant pour sous bassement	Liège sur les 40 premiers cm
Détail ossature secondaire	Ossature verticale en bois fixé dans empochements ciments réalisés dans murs en pisé. Entraxe de l'ossature : 3 cm de moins que l'axe de la laine de bois (maintien de la laine en pression dans ossature).
Epaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	3.85 m ² . K/W
M ² d'isolant	180 m ² / 200 m ²
Coût de l'isolation	174 euros/m ² pose et fourniture
Finition extérieur	Enduit chaux tramé avec fibre de verre (1cm)

Le choix de la laine de bois, associée à la fibre de bois rigide, permet d'obtenir un isolant

suffisamment rigide pour l'application d'un enduit à la chaux en extérieur, tout en préservant la cohérence avec le patrimoine architectural local, composé en grande partie de bâtiments en pisé enduit dans cette région. Une alternative consiste à utiliser une solution d'insufflation de vrac derrière des panneaux de fibre de bois, offrant ainsi une possibilité d'isolation en cas d'irrégularités du mur à rénover. La continuité de l'isolant avec le pisé est un critère essentiel pour éviter toute formation de condensation entre les deux matériaux.

De plus, dans le cadre de la rénovation, le choix de n'isoler que les murs orientés Nord semble pertinent. Cela permet de garder le pisé apparent sur les autres faces et de profiter des apports calorifiques du soleil sur les faces orientées Sud (mur de masse). Dans le cadre de ce projet, une serre climatique a été mise en place sur la façade Sud. Concernant les traitements du pied de façade, le choix s'est tourné vers l'isolant liège, qui est imputrescible. Bien que cet isolant soit très imperméable à la vapeur d'eau, il est ici mis en œuvre ponctuellement en pied de façade sur les parties en contact avec le sol humide et les remontées capillaires.

On retrouve plusieurs cas de figure d'isolation en fibre et laine de bois en réhabilitation. En effet, cette technique relativement courante est accessible en termes de coût. Cependant, les matériaux mis en œuvre dans ce cas de figure restent plus impactants écologiquement parlant en comparaison à d'autres isolants bio et/ou géo sourcés.



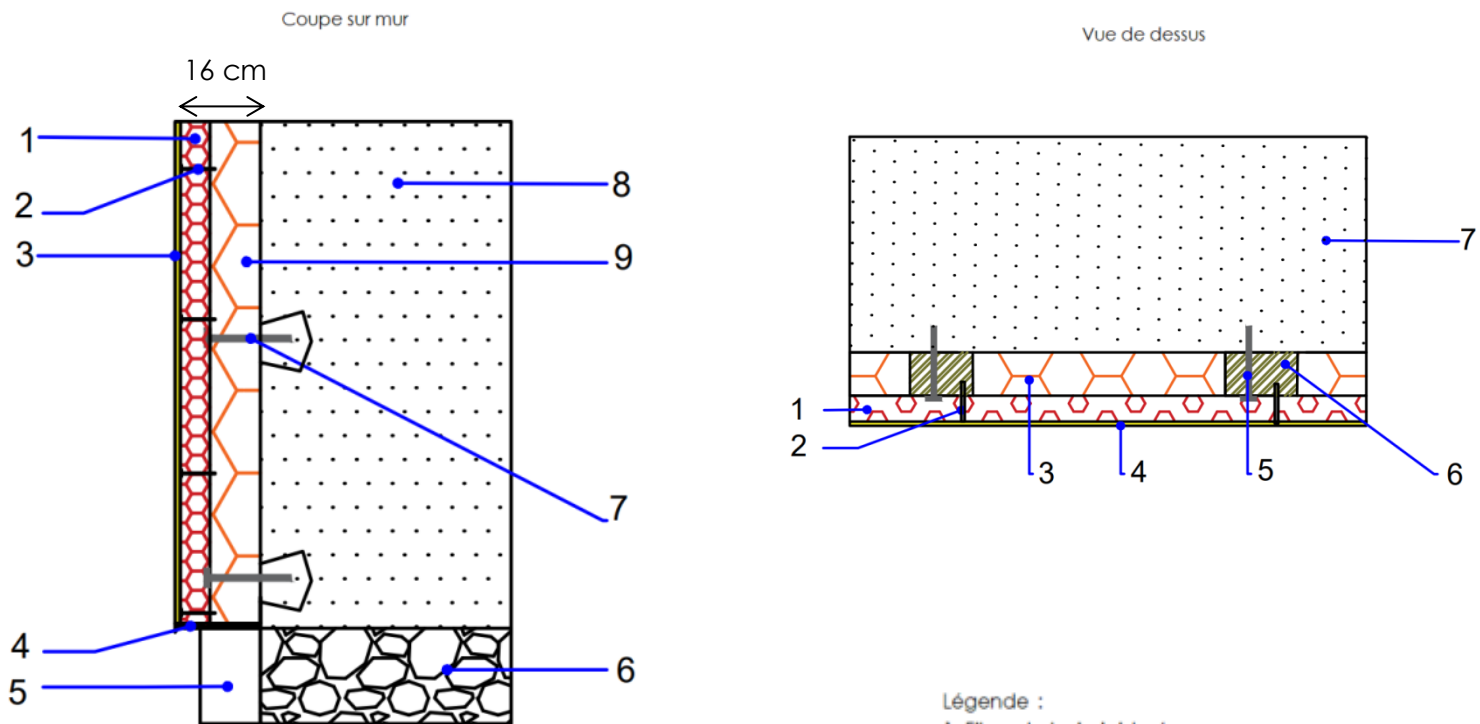
Figure 22 : Rénovation Brullioles, Source : espace info énergie, crédits photos : Domébio

⁴⁵ INFO ENERGIE 69, 'Rénovation et extension d'une maison en pierres et pisé', *La cartographie des grands projets*, 2023.

⁴⁶ 'Rénovations et Agrandissements', *Dom&Bio* <<http://www.domebio.fr/particuliers-renovation/canonical-url/>>.



Figure 23 : Rénovation Brullioles, Source : espace info énergie, crédits photos : Domébio



Légende :

1. Fibre de bois rigide 6 cm
2. Fixation de la fibre de bois rigide sur les montants bois verticaux
3. Enduit tramé à la chaux 1 cm
4. Bavette métallique
5. Isolant en liège
6. Sous-bassement pierre existants
7. Fixation des montants d'ossature bois verticaux dans le pisé
8. Pisé
9. Laine de bois souple déroulée (10 cm) entre montants d'ossature bois verticale

Légende :

1. Fibre de bois rigide 6 cm
2. Accroche mécanique des panneaux rigide sur ossature bois
3. Laine de bois souple
4. Enduit chaux tramé 1 cm
5. Fixation des ossatures bois verticales dans mur pisé
6. Ossature bois verticale
7. Pisé

Rénovation d'une maison en pisé – isolation paille

Tableau 3: Caractéristiques projet isolation paille

Projet	Rénovation d'une maison
Usage	Habitation
Lieu	Hauterive (26)
Date du bâtiment	1884-1886
Architecte/ maître d'œuvre	Sans architecte, le client est charpentier et constructeur paille
Entreprise d'isolation	Atelier du bois
Propriétaire	Julien Cerri, charpentier et constructeur paille
Date du chantier	2010
Nature des murs en terre crue	Pisé
Remarques spécifiques à la réhabilitation	Sous bassement non isolés
Quels murs isolés	Isolation de l'ensemble des façades
Type d'isolation	Demi-botte de paille et isolant type laine ou fibre de bois ponctuellement pour traiter embrasures par exemple.
Sous bassement	Non isolés
Ossature secondaire	Ossature principale verticale en bois fixée en partie basse dans la lisse sur pilotis et en partie haute dans les chevrons avec quelques tiges filetées au milieu du mur repris dans le pisé. Ossature horizontale tous les trois rangs pour maintiens au déversement en compression sur les bottes.
Épaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	18.5 cm d'épaisseur R=3.6 m ² .K/W
M2 d'isolant	NC
Cout de l'isolation	100% auto construit et paille gratuite
Finition extérieure	Bardage bois

Entretien avec Julien Cerri disponible à l'annexe n°20.

Dans le cadre d'une rénovation, l'isolation par botte de paille me semble très pertinente, en particulier pour son faible impact environnemental. En effet, l'isolant non manufacturé est produit localement à partir de matériaux naturels sans transformation. On retrouve la paille de façon abondante partout en campagne. De plus, la rénovation par voie sèche me semble être un bon compromis, cela signifie un gain de temps car il n'y a pas de mélange à réaliser et un nettoyage moindre des ustensiles de chantier notamment. Cette technique d'isolation permet une finition par enduit chaux.

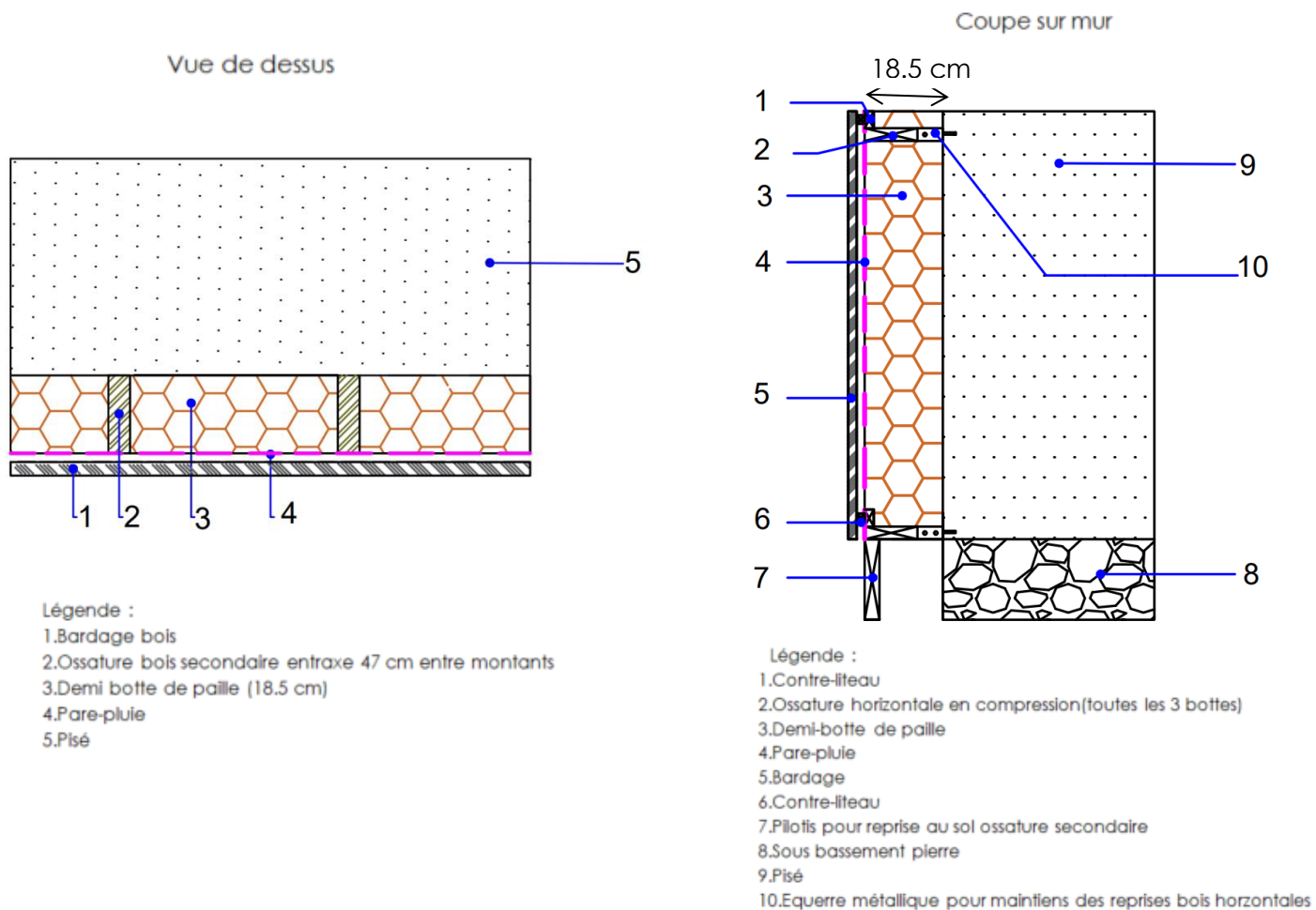
Le chantier présenté est isolé avec des demi-bottes. Ce qui nécessite de rebotteler avant de mettre en place les bottes dans l'ossature. Cela entraîne un temps supplémentaire sur chantier, mais l'usage de demi-bottes permet d'avoir une ossature secondaire en bois et une épaisseur de complexe de mur moins conséquente qu'avec des bottes entières. Pour obtenir une résistance thermique supérieure, il est possible de mettre en œuvre des bottes entières (résistance supérieure à 7 m².K/W). Pour ce chantier, le choix de la finition « bardage bois » a été guidé par le savoir-faire du client-constructeur charpentier. Enfin, les problématiques préexistantes d'humidité dans les soubassements ont conduit à ne pas isoler ces derniers, afin que l'humidité puisse s'évacuer facilement. Cette solution présente le bémol de laisser apparaître un pont thermique en pied de mur.



Figure 24: : ITE en botte de paille, crédits photos : julien Cerri



Figure 25 : ITE en botte de paille, crédits photos : julien Cerri



Reconversion d'une grange en pisé en loft d'habitation – Isolation en ouate de cellulose projetée

Tableau 4 : Caractéristiques projet isolation ouate projetée

Projet	Reconversion d'une grange en loft ⁴⁷
Usage	Habitation
Lieu	Chèzeneuve (38)
Date du bâtiment	1800-1900
Architecte/ maître d'œuvre	Caracol Architecture
Entreprise d'isolation	NC
Propriétaire/ Maître d'Ouvrage	Nicolas Caribotti
Date du chantier	2021
Nature des murs en terre crue	Pisé
Remarques spécifiques à la réhabilitation	Diagnostic du pisé réalisé avant conception. Pisé visible côté intérieur.
Quels murs isolés	Tous
Type d'isolation	Projection de ouate de cellulose humide sur doubles ossatures bois croisés
Épaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	NC
M2 d'isolant	NC
Coût de l'isolation	NC
Finition extérieur	Enduit chaux

La ouate de cellulose projetée permet un gain de temps sur chantier. De plus, le coût de ce matériau est très compétitif, puisqu'il est du même ordre de grandeur qu'un matériau plus conventionnel, type laine de roche, laine de verre. La projection humide permet d'épouser pleinement la forme du mur à isoler. Cependant, il n'est pas possible d'appliquer directement l'enduit chaux sur la ouate de cellulose pour des questions de tenue mécanique notamment. La Fibralth (panneau de laine de bois constitué de fibres longues enrobées de ciment) a été choisie comme support d'enduit à la chaux. En effet, sa rugosité permet une bonne adhérence de l'enduit. La Fibralth a été posée sur lame d'air ventilée comme un bardage. En effet, le ciment présent dans les panneaux de Fibralth étant relativement fermé à la vapeur d'eau, la lame d'air ventilée semble indispensable derrière ce matériau. De plus, les avis techniques orientent vers une pose de la Fibralth en extérieur sur lame d'air. Ce « bardage » prêt à enduire avec des panneaux de Fibralth a un impact environnemental plus conséquent que s'il avait été possible d'appliquer directement un enduit à base de chaux sur l'isolant. Ce complexe présente le désavantage d'être composé de nombreuses couches de matériaux.



Figure 26 : Isolation ouate de cellulose projetée, source et crédits photos : Caracol

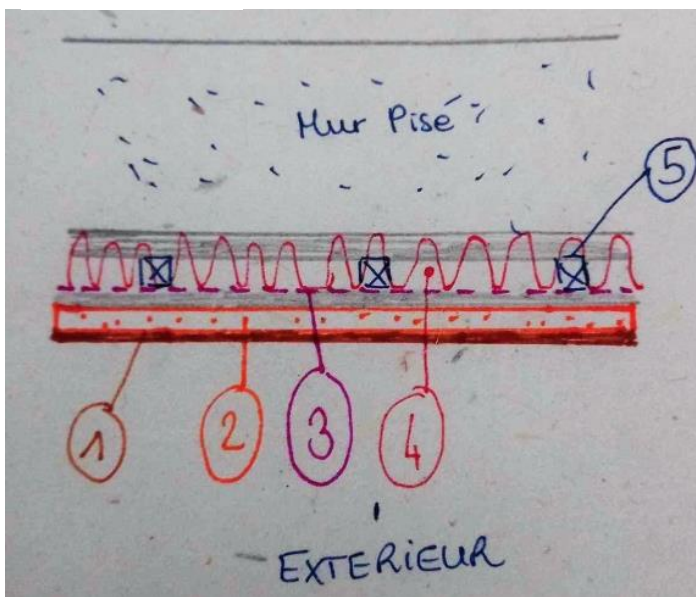
⁴⁷ 'CHÈZENEUVE - TERA-TERRÉ' <<https://www.tera-terre.org/chezeneuve/>>.



Figure 27 : Isolation ouate de cellulose projetée, source et crédits photos : Caracol

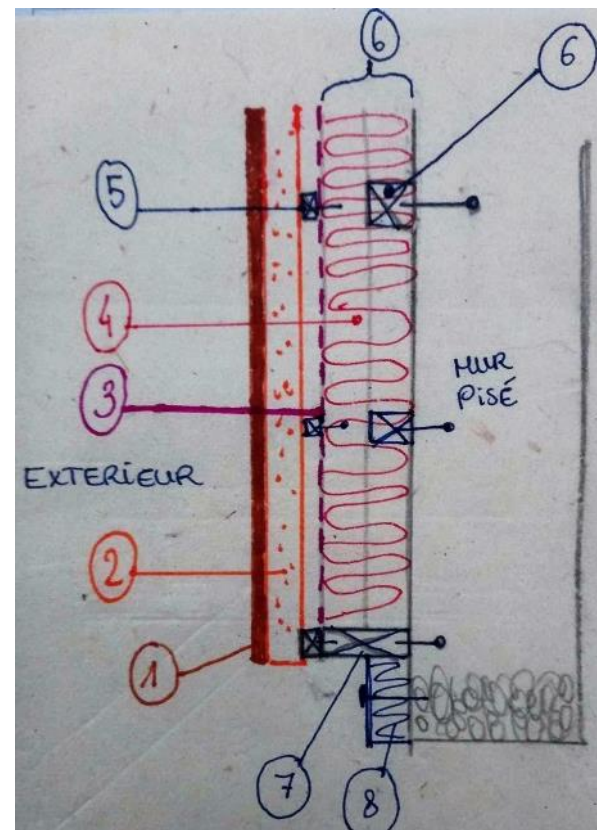
Coupe sur mur

Vue de dessus



Légende :

- 1. Enduit chaux tramé
- 2. Plaques de fibralth
- 3. Pare pluie
- 4. Isolation projeté ouate de cellulose
- 5. Double ossature croisé en bois



Légende :

- 1. Enduit chaux tramé
- 2. Plaques de fibralth
- 3. Pare pluie
- 4. Isolation projeté ouate de cellulose
- 5. Contre liteau pour fixation fibralth et lame d'air ventilée
- 6. Double ossature bois croisé
- 7. Lisse basse en bois
- 8. Isolant imputrescible en liège pour pied de mur

Réhabilitation d'une bâtisse en pisé – Isolation en panneaux de roseau

Tableau 5: Caractéristiques projet isolé panneaux de roseaux

Projet	Réhabilitation d'une bâtisse en pisé
Usage	Habitation
Lieu	Charbonneau
Date du bâtiment	1800-1900
Architecte/ maitre d'œuvre	
Entreprise d'isolation	Entreprise Akterre
Propriétaire/ Maitre d'Ouvrage	NC
Date du chantier	2004
Nature des murs en terre crue	Pisé
Remarques spécifiques à la réhabilitation	Les murs ont été préalablement réparés à l'aide d'adobes
Quels murs isolés	Tous
Type d'isolation	Panneaux de roseaux Claytec (origine Allemagne)
Epaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	Coefficient de conductivité thermique (en W/m.°C) : 0,056
M2 d'isolant	NC
Cout de l'isolation	NC
Finition extérieur	Enduit de terre crue

Dans le cadre de ce projet, des panneaux de roseaux Claytec ont été mis en place. Ils sont collés au mortier de terre, et enduits de terre crue. Ce complexe d'isolation est réalisé uniquement à partir de produits naturels et recyclés (terre de site).

Le panneau de roseau fait office de support d'enduit et permet de mettre en œuvre un enduit correcteur sur des épaisseurs allant jusqu'à 6 cm. L'isolation apportée par ce produit dépend de l'épaisseur du panneau de roseau. Pour atteindre une résistance thermique d'environ 2 m².K/W, il faut mettre deux panneaux de roseau croisés de 5 cm.

L'isolation avec des panneaux de roseau est souvent utilisée en rénovation pour améliorer le confort thermique en apportant une correction thermique des murs du côté extérieur. Sa facilité de mise en œuvre, le fait que le panneau puisse épouser la forme du mur existant et qu'il se découpe facilement en font un matériau de premier choix pour la rénovation et l'amélioration thermique de l'habitat. Cependant, pour atteindre une résistance thermique plus élevée, notamment pour un bâtiment neuf ou une réhabilitation passive, il semble nécessaire de se tourner vers d'autres techniques.

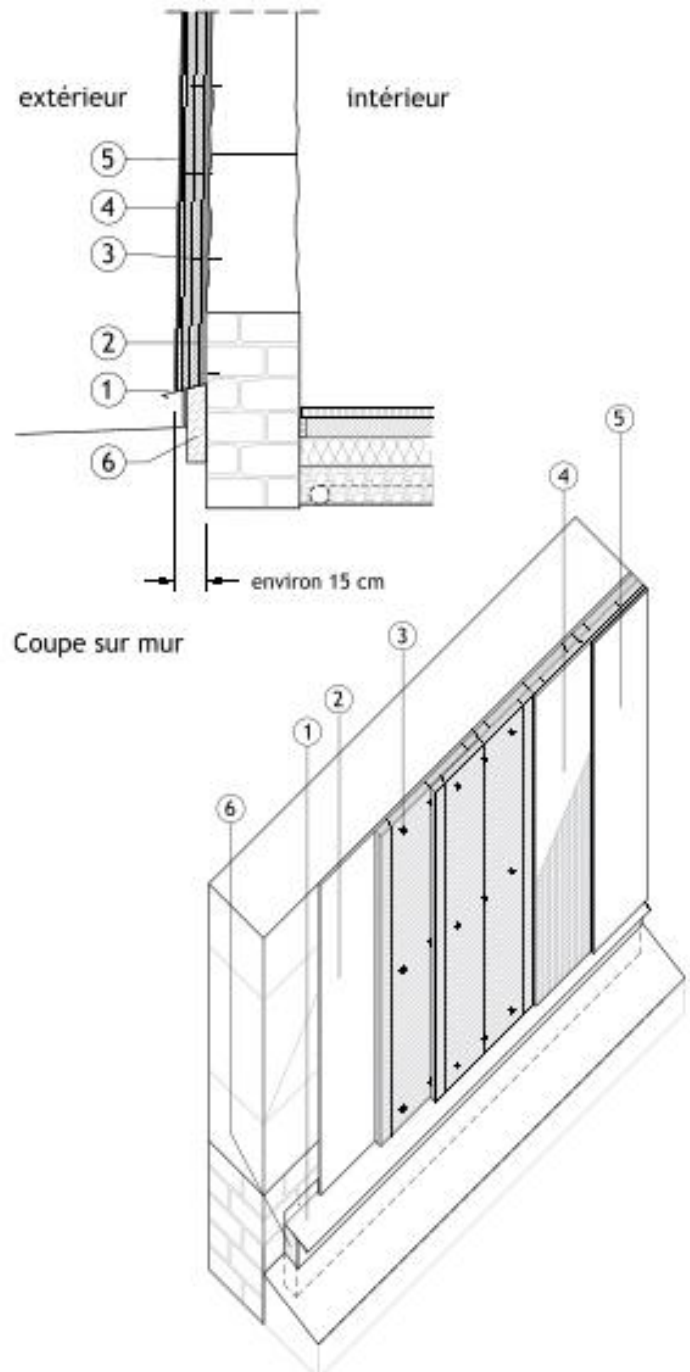


Figure 28 ; Maison ITE roseaux, source et crédits photos : Martin Pointet



Figure 30 ; Maison ITE roseaux, source et crédits photos : Martin Pointet

Figure 29 Panneaux de roseaux, source : réhabiliter le pisé



216. Isolation thermique extérieure par panneaux de roseaux collés.

1. Bavette métallique.
2. Pose d'un mortier de terre pour coller les panneaux de roseaux.
3. Fixation des panneaux de roseaux avec des chevilles à expansion.
4. Pose d'un corps d'enduit armé d'une toile minérale ou végétale.
5. Pose d'un enduit de finition.
6. Pose de panneaux de liège avec un enduit armé d'une toile minérale et enduit de finition.

B. Isolation par l'extérieur de mur contemporain en terre

Projet le foyer – Isolation chaux-chanvre projeté

Tableau 6: Caractéristiques projet isolation chaux-chanvre projeté

Projet	Construction du centre d'hébergement de la maison familiale et rurale) et du foyer d'apprentis ⁴⁸
Usage	Hébergement et restauration
Lieu/Pays	Ribérac(24)/ France
Architecte/maitre d'œuvre	Dauphins architectes, Faiçal Oudor & Gauthier Claramunt
Bureaux d'études	Jean-Marie le Tiec et Dorian Vauzelle pour l'accompagnement pisé
Entreprise d'isolation	Bouchard
Maitre d'Ouvrage	CdC du pays ribéraçois
Date de livraison	2019
Nature des murs en terre crue	Pisé non stabilisé (terre de site)
Remarques spécifiques	Hébergement Périscolaire BEPOS – degré 4C2 atteint
Quels murs isolés	Le mur en pisé est au Sud Le seul mur en pisé est isolé par ITE
Type d'isolation	Isolation chaux chanvre projetée
Epaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	26 cm / R=6.6 m ² .K/W avec un lambda de 0.039 W/m. K
M2 d'isolant	400 l de coffrage à remplir par projection (2.5m ³ /heure en rendement machine).
Cout de l'isolation	250 €HT/m ² chaux chanvre et 54€ht/m ² enduit chaux
Finition extérieur	Enduit chaux

Pour ce projet, la projection a eu lieu par voie sèche. C'est-à-dire que deux buses envoient d'un côté la chènevotte sèche et de l'autre la chaux liquide qui va venir fixer la chènevotte au moment où les deux projections se croisent. Ce procédé permet d'optimiser la capacité

isolante du matériau, en effet un minimum de chaux est nécessaire pour fixer une grosse quantité de chènevotte, ce qui rend le matériau plus isolant que par le procédé de tassement entre banches par exemple. De plus, un gobetis à la chaux a été appliqué sur le mur en pisé fraîchement réalisé pour permettre une meilleure adhérence entre le chaux-chanvre et le mur en pisé. Enfin, une double ossature décollée du mur en terre (fixée dans les queues d'arondes mises en attente ponctuellement dans le pisé) est réalisée afin que le chaux-chanvre englobe parfaitement l'ossature et soit en tout point en contact avec le pisé. Le remplissage se fait caisson après caisson avec un rendement machine de 2.5 m³/h. Une vidéo de la projection a été réalisée et donne une bonne idée du déroulement de l'opération⁴⁹.

Cette technique permet d'avoir un isolant qui épouse parfaitement la forme du mur. On remarque la parfaite continuité tant thermique qu'hygroscopique et capillaire entre les différentes couches (pisé et chaux-chanvre). On a donc un mur monolithique multicouche.

Etant donné le coût onéreux du pisé, les architectes ont dû choisir la localisation précise de ce matériau en toute intelligence. En effet, le mur en pisé a été localisé sur la zone de l'auvent donnant sur les espaces majeurs du projet. En comparatif un tel complexe de mur est environ trois fois plus onéreux qu'un mur en MOB/Paille.

Les architectes ont opté pour l'isolation par l'extérieur afin de conserver la masse du pisé côté intérieur. Ils ont opté « naturellement » pour le matériau chaux-chanvre pour sa compatibilité avec le pisé. Le mur en question est orienté au sud avec une casquette conséquente pour limiter les rayonnements solaires en été. Initialement, il avait été envisagé un enduit terre crue étant donné l'importante dépassée de toiture. Cependant, et par précaution notamment vis-à-vis des extrémités du mur qui peuvent être soumises à la pluie, un enduit chaux a été finalement mis en place.

Un des points faibles de ce matériau est sa faible conductivité, ce qui entraîne la mise en œuvre d'une couche isolante conséquente. Le

⁴⁸ 'LeOFFduDD2021 - Foyer d'apprentis à Siorac-de-Ribérac (24) - YouTube'
<<https://www.youtube.com/watch?v=WdRJSkOJRJo>>.

⁴⁹ 'Projection Chaux Chanvre - YouTube'
<<https://www.youtube.com/watch?v=EbNFY8foK80>>.

complexe (pisé + chaux-chanvre) mesure 70 cm d'épaisseur dans le cas du projet. L'architecte Gauthier Claramunt, co-gérant de l'agence dauphins architecture, explique : *«L'inconvénient du chaux/chanvre, c'est sa résistance thermique assez faible (dans le champ des isolants), mais c'est largement compensé par son hygroscopie. Ce n'est pas la seule fois qu'on a fait du chaux/chanvre donnant sur l'extérieur et on ne le regrette pas. Il faut "simplement" réussir à le financer dans une opération à l'économie classique ».*

Le chaux-chanvre sous sa forme projetée semble être un matériau intéressant, notamment pour sa continuité physique avec le pisé et la masse supplémentaire rapportée. Si on compare avec le terre-chanvre qui permet la même continuité :

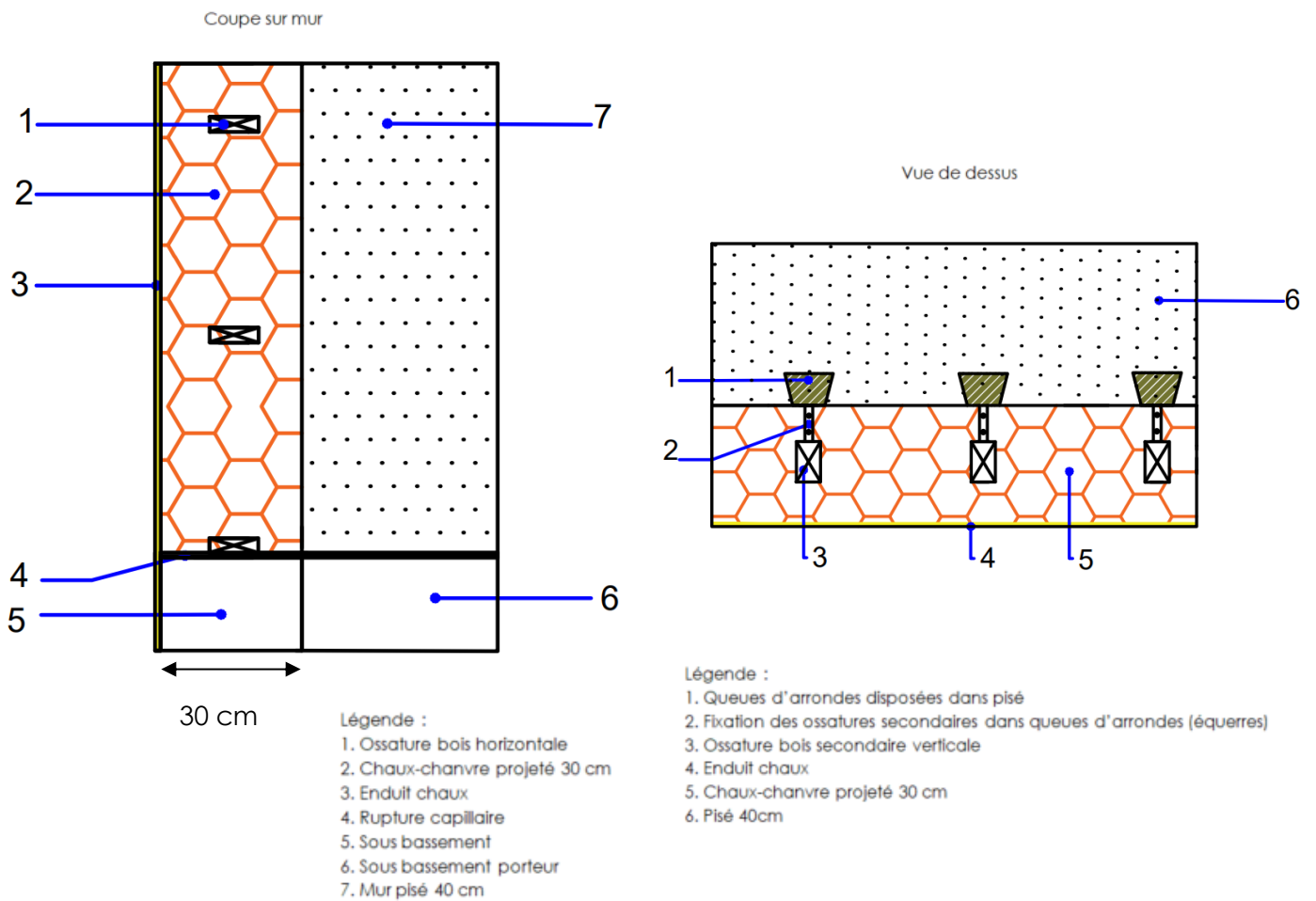
- Le chaux-chanvre est régi par des règles professionnelles, ce qui facilite sa mise en place.
- Du fait du liant « chaux » qui nécessite une cuisson, son impact environnemental est supérieur à celui du terre-chanvre.



Figure 31 : Le foyer Ribérac, source : Dauphins architecture site internet



Figure 32 : « Le foyer » Ribérac, source : Dauphins architecture site internet



Alnatura corporate campus, Allemagne – Isolation granulats de verre cellulaire

Tableau 7: Caractéristiques projet double mur pisé isolé

Projet	Campus de l'entreprise Alnatura⁵⁰
Usage	Bureaux
Lieu/ pays	Darmstadt, Hesse, Allemagne
Architecte/ maître d'œuvre	Haas Cook zemmrich studio2050
Bureaux d'études	Transsolar GmbH (énergie)
Entreprise d'isolation	Lehm Ton Erde, dirigé par Martin Rauch ⁵¹
Maître d'Ouvrage	Campus 360 GmbH
Date de livraison	2017
Nature des murs en terre crue	Pisé
Remarques spécifiques	Murs en pisé non stabilisé avec isolation intégrée dans la banche. Les modules sont préfabriqués à une dizaine de mètres du chantier.
Quels murs isolés	Les murs en pisé sont sur les façades Est et Ouest avec isolation intégrée dans l'épaisseur du mur.
Type d'isolation	17 cm de verre cellulaire en vrac (misapor)
Epaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	17cm / R=1. 4m ² .K/W avec un lambda de 0.12 W/m. K
M2 d'isolant	NC
Cout de l'isolation	NC
Finition extérieur	Pisé brut

L'entreprise de Martin Rauch est connue pour la réalisation de mur pisé préfabriqué. En effet, ils ont la possibilité de déployer à côté du chantier une usine mobile pour préfabriquer à l'abri des intempéries à proximité du site d'assemblage. Pour ce chantier en particulier, l'usine abrite un coffrage de 30 m de long dans lequel une machine sur rail vient compacter la terre humide déversée par couches successives. Après décoffrage, le pisé est découpé en module. Ce complexe de mur pourrait également être réalisé in situ.

Dans ce projet, une volonté forte est apportée à conserver le pisé visible de chaque côté de la paroi. Par élimination, le verre cellulaire est un choix judicieux car il remplit complètement les fonctions attendues dans ce projet. En effet, cet isolant est particulièrement adapté pour les parois ou le recours à un isolant imputrescible, non altérable et résistant à la compression est nécessaire ($R_{comp} = 420 \text{ kN/m}^2$). Ce dernier point explique qu'il puisse être pisé avec la terre dans la même banche (ce qui n'est pas le cas de l'ensemble des autres isolants). Son côté imputrescible et non altérable est rassurant car lors de la modélisation de la paroi sur UBAKUS (annexe n°18), on retrouve un léger risque de condensation que la terre saura absorber et évacuer par capillarité, mais qui à long terme pourrait endommager l'isolant mis en œuvre si ce dernier n'est pas imputrescible. On note ici l'importance d'une étude au cas par cas en statique, mais aussi en dynamique, afin de vérifier la faisabilité de chaque complexe isolant dans les projets impliquant la terre crue. De plus, le verre cellulaire sous sa forme « panneau » est classé imperméable à la vapeur d'eau (voir annexe 7). Cependant, sous la forme « vrac », compte tenu de sa porosité inter-granulaire, les granulats de verre cellulaire présentent une grande perméabilité ($\mu = 2$ sur le logiciel UBAKUS). Enfin, ce matériau n'a pas une très bonne conductivité thermique, de ce fait ce n'est pas un isolant très performant. Pour 17 cm de granulats de verre cellulaire, la résistance thermique de la couche obtenue est de l'ordre de $R = 1,4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Cette couche n'étant que peu isolante, l'intégralité du mur en pisé sera donc en partie « chaude », ce qui limite également les risques de condensation dans la paroi. De plus, comme souligné dans la partie 1 de ce mémoire, d'autres phénomènes thermiques entrent en jeu avec le matériau terre crue. Donc, malgré la faible résistance thermique du mur il n'en fait pas moins un bâtiment performant et confortable.

⁵⁰ 'Alnatura Campus | Transsolar | KlimaEngineering'
<<https://transsolar.com/de/projects/alnatura-campus>>.

⁵¹ 'Alnatura Campus | Loam Clay Earth, Martin Rauch, Vorarlberg'
<<https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?pid=97>>.



Figure 33 Projet Alnatura , source : <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?pid=97>



Figure 34 : Vue de dessus sur la banche, source : <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?pid=97>

Projet carré flore – Isolation laine et fibre de bois

Tableau 8: Caractéristiques projet BTC isolées laine de bois

Projet	Carré flore
Usage	91 Logements, s'inscrit dans l'aménagement de la ZAC (Zone d'Aménagement Concertée) nommée « Monges Croix du Sud » de 12 hectares
Lieu/ pays	Cornebarrieu (31)
Architecte/ maître d'œuvre	Clément Vergély Architectes
Bureaux d'études	Ecozimut (thermique et environnement)
Entreprise	Brique technique concept pour les BTC
Maître d'Ouvrage	Promoteur Green city immobilier, aménageur de la ZAC OPPIDEA
Date de livraison	En cours en septembre 2023
Nature des murs en terre crue	Méga BTC stabilisées
Remarques spécifiques	Démarche bâtiment durable Occitanie (niveau argent obtenu) E3C1
Quels murs isolés	Les murs en BTC isolés sont les deux pignons pleins des bâtiments V et C.
Type d'isolation	Laine de bois en première couche + une couche fibre de bois rigide
Epaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	Méga BTC 30 cm + isolant bicouche 14 cm
M2 d'isolant	NC
Cout de l'isolation	NC
Finition extérieur	Initialement prévu enduit chaux mais finalement bardage bois réalisé

Le projet a pour thématique principale « les bio et géo sourcés porteurs des bâtiments de demain ». En effet, dans ce projet, les façades bois et les mégas BTC portent les planchers en béton. Avec cette contrainte technique, les acteurs du projet ont pu prouver que les matériaux bio et géo sourcés étaient tout à fait capables de remplacer la construction conventionnelle en béton tout en minimisant les impacts environnementaux. Le projet a été récompensé par la démarche bâtiment durable Occitanie en obtenant le niveau argent.

De plus, Laurent Chauveau, co-gérant de la SCOOP Ecozimut explique qu'une partie du

projet a pu être subventionnée par la justification des performances énergétiques. Il explique également que ce projet a pu être moteur et porteur pour le travail de l'ATEX de la société Brique Technique Concept (fabricant de BTC). Le niveau E3C1 a été obtenu. Laurent Chauveau précise que le niveau C1 est dû à la BTC qui était mal valorisée initialement, ce qui a été modifié par l'édition de nouvelles FDES établies par Brique Technique concept qui permet de valoriser plus justement le matériau.

Dans ce projet, la méga BTC peut être comparée à du pisé préfabriqué. Cette technique permet de mettre en œuvre le matériau terre crue sous sa forme déjà sèche et de s'affranchir des soucis liés aux intempéries notamment.

Les détails constructifs sont les mêmes que le cas présenté page 29 « Rénovation d'une ancienne ferme en pierre et pisé – isolation laine de bois/fibre de bois à Brulioles », en remplaçant le pisé par la méga BTC. Les arguments concernant l'isolation sont donc les mêmes que ceux avancés page 29 également.



Figure 36 : réalisation des mégas BTC pour le projet carré flore, sources : Ecozimut



Figure 35: images phases conception du projet, sources : Ecozimut

Projet Cob Bauge – Isolation terre allégée⁵²



Figure 37 : Projet pilote Cob bauge, source : site internet Cob bauge

Ce projet inter-régional européen, dénommé « Cob bauge », a pour objectif de répondre aux critères contemporains d'isolation thermique, de résistance, de bilan carbone, de coût de construction en optimisant la mise en œuvre de la bauge pour la rendre plus concurrentielle. Le but de la recherche est de rendre ce matériau moderne et répliquable pour de nombreux projets. Ce projet s'appuie sur une approche scientifique transversale en laboratoire et sur le chantier, menée conjointement avec l'ESITC de Caen, l'université de Plymouth en Angleterre, le parc des marais du Cotentin et un cabinet d'architecte entre autres. Il s'agit d'expérimenter des formulations et des techniques de mise en œuvre afin de faire de ce matériau vernaculaire un matériau d'avenir.

Les recherches ont été faites afin de conserver le côté porteur de la bauge ainsi que l'ensemble des caractéristiques thermiques et hydriques de ce matériau, tout en lui ajoutant un pouvoir isolant pour répondre à la réglementation actuelle. Ainsi, un nouveau matériau « sandwich » a été créé avec, du côté intérieur, la partie porteuse en bauge et, du côté extérieur, une terre allégée isolante. On retrouve

donc ces deux matériaux dans une même banche. Le procédé reste actuellement coûteux, mais il est aussi possible de construire seulement partiellement avec ce matériau.

C'est à Saint-André-de-Bohon (Manche), à la ferme du Bas-Quesnay, propriété du Conseil départemental de la Manche, que la première expérimentation de construction neuve en bauge façon XXI^e siècle a été menée, depuis deux ans, par le Parc des marais et les étudiants de l'ESITC de Caen. Ce bâtiment de 13m² reprend toutes les caractéristiques d'une construction normale de bâtiment avec des conditions météorologiques particulièrement humides et fraîches. Le prototype a été appareillé afin de voir comment se comporte le complexe pendant les phases de mise en œuvre, de séchage et d'exploitation.

Avec l'utilisation d'une ressource locale, ce matériau « sandwich » s'inscrit complètement dans une logique d'économie circulaire et permet le réemploi des terres excavées pour les fondations du projet notamment. Cette possibilité de pouvoir utiliser ce qui se trouve sous nos pieds et d'avoir un matériau qui offre un confort en été, fait du complexe (bauge et terre allégée) un produit d'avenir vis-à-vis des enjeux environnementaux.

Dans la même lignée de réflexion et dans le cadre de la future thèse, il serait intéressant d'étudier les possibilités offertes par le matériau pisé en le couplant avec un matériau bio-géo sourcé également. Cependant, à l'inverse de la bauge, le pisé est mis en œuvre à l'état humide et nécessite le déploiement d'une forte force de compaction. Ce dernier point soulève la question du maintien de l'intégrité physique de l'isolant déployé dans une même banche que le pisé.

⁵² 'CobBauge - Film Long on Vimeo'
<<https://vimeo.com/789960429/d9d2fc945e?fbclid=IwAR0P0u0nKtp2YvMb30Ex-Aep9cbgGfpTntsdrX1s1ETo6ZsbuO0h->

RSvpFMhhttps://actu.fr/normandie/saint-andre-de-bohon_50445/et-si-la-terre-re-devenait-le-meilleur-matériau-pour-construire-des-maisons_47181667.html>.



Figure 38 : Projet pilote Cob baugé, source : site internet Cob baugé

Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen – Extension isolée en liège

Tableau 9: Caractéristiques projet doubles murs pisé isolés liège

Projet	Réhabilitation et extension de la Maison Koeppel en – Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen
Usage	Etablissement public, musée
Lieu/ pays	Dehlingen
Architecte/ maître d'œuvre	Nunc architectes
Bureaux d'études	SIB études (structure) Ali Mesbah ENTPE (consultant terre)
Entreprise	Caracol
Maître d'Ouvrage	Le Conseil communautaire de la communauté de communes d'Alsace bossue
Date de livraison	2013
Nature des murs	Les murs de l'extension Sud, Est et Ouest sont en pisé stabilisé (terre prélevée à 5 km du site)
Quels murs isolés	-Pignon sud : en pisé doublé d'une paroi vitrée - chauffage solaire passif -Ouest : pisé + liège + Briques enduit chaux -Est : Pisé + liège en vrac+ préfa pisé, façade d'entrée de l'équipement
Type d'isolation	Liège en vrac
Epaisseur d'isolant/ Résistance thermique	20cm – R=4.4 m2K/W
M2 d'isolant	NC
Cout de l'isolation	NC
Finition extérieure	Parement préfabriqués pisé

Ce projet a remporté le prix national des architectures contemporaines en terre crue 2013. La silhouette du nouveau bâtiment s'inspire des maisons à colombages alsaciennes⁵³.

La façade Sud du musée est un mur trombe (pisé banchée et baie vitrée). Les salles du musée bénéficient de l'air chauffé par le soleil entre le rideau de verre et le pisé.

La façade Ouest du musée est constituée d'un mur porteur en pisé banché, isolé par 20 cm de

liège et revêtu à l'extérieur de briques porotherm enduites à la chaux.

La façade Est du projet est constituée d'un mur porteur en pisé banché, isolé par 20 cm de liège en vrac et revêtu à l'extérieur par un parement pisé préfabriqué autoporteur.

Dans le cadre de ce projet, les principaux freins rencontrés concernant la préfabrication sont liés au caractère « en cœur du village » du chantier. En effet, pour la préfabrication, un espace dédié est nécessaire et conséquent. De plus, le coût assez onéreux de cette préfabrication a induit un changement de finition extérieure pour le mur situé à l'Ouest du projet.

Les simulations thermiques statiques démontrent un risque de condensation dans la façade Est entre l'isolant et le parement extérieur, uniquement pour des températures en dessous de -7°C à l'extérieur et 19°C en intérieur. Or, en période hivernale, le centre ne sera que peu utilisé, et de ce fait, la température de consigne intérieure sera de 16°C. Ces arguments limitent d'autant plus le risque de condensation, puisque pour une température de 16°C à l'intérieur, il faut une température extérieure de -9°C pour que la condensation se produise. De plus, les calculs dynamiques réalisés avec le logiciel WUFI (qui prennent en compte la sorption/désorption du pisé) ont montré que les transferts d'humidité étaient bien inférieurs aux calculs réalisés en statique.

Cet isolant a été choisi, puisque tout comme le verre cellulaire, il est imputrescible et inaltérable. Etant donné les risques de condensation (même si peu élevés) d'un tel « panneau sandwich », il est tout à fait cohérent d'opter pour un matériau imputrescible comme le liège, d'autant plus que sous sa forme « en vrac » cet isolant reste donc capillaire et perméable à la vapeur d'eau.

⁵³ Dominique Gauzin-Müller and others, *Architecture En Terre d'aujourd'hui* (Museo éditions, 2016)

<https://www.architectes.org/sites/default/files/atoms/files/170907_terra_francais.bd_.pdf> [accessed 3 October 2023].



Figure 39: Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen, source : Nunc architecte

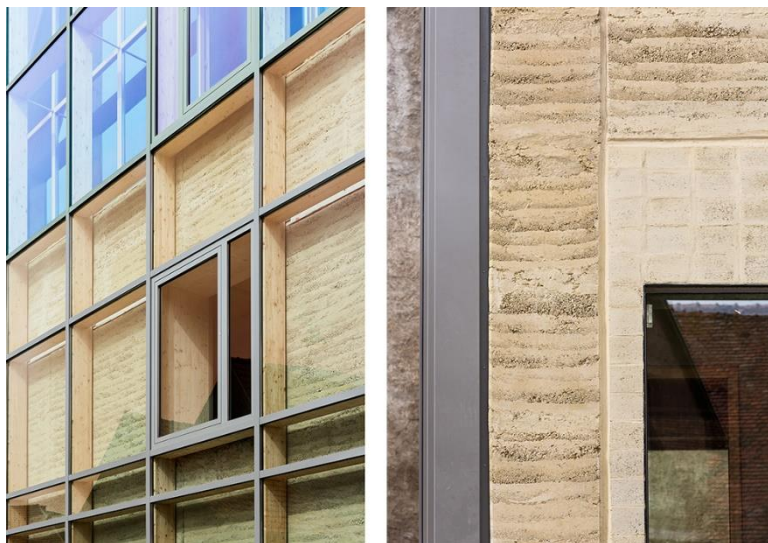


Figure 40 Mur trombe du centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen, source : Nunc architecte

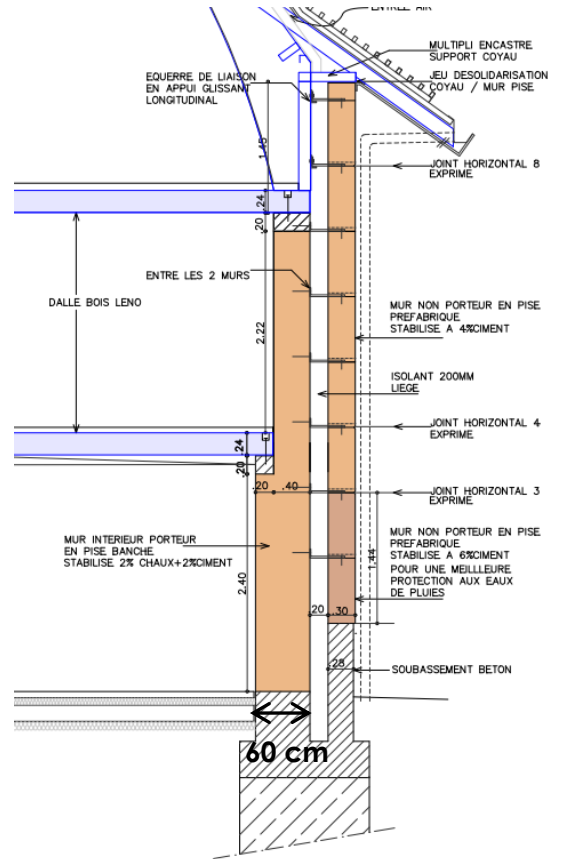


Figure 41 Coupe sur double mur façade EST, source : Nunc architectes

C. D'autres exemples d'ITE en bio-géo sourcé

Projet collège innovant de Béthoncourt - Isolation terre-chanvre projeté

Tableau 10: Caractéristiques projet murs isolés en terre allégée

Projet	Collège innovant
Usage	Etablissement scolaire (collège) et 3 logements
Lieu/ pays	Béthoncourt
Architecte/ maître d'œuvre	CRR Architecture
Bureaux d'études	BE Terre
Entreprise	Calyclay
Maître d'Ouvrage	Département du Doubs
Date de livraison	En cours de réalisation (le tiers de l'ITE a été réalisé en septembre 2023), livraison prévue pour 2024
Nature des murs	ITE sur Ossature bois, remplissage 22 cm fibre de bois et habillage intérieur BTC 20 cm
Remarques spécifiques	Niveau E4C2 visé ainsi que le niveau BEPOS Effinergie 2017.
Quels murs isolés	
Type d'isolation	Terre-Chanvre projeté (terre de site)
Épaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	15 cm terre-chanvre, si λ de 0.1 W/m. K, R= 1.5 m ² . K/W
M2 d'isolant	150 m ²
Cout de l'isolation	
Finition extérieur	Enduit chaux

Innovant en termes d'isolation, ce projet permet d'expérimenter l'isolation terre-chanvre projetée en extérieur. En effet, pour l'entreprise Calyclay, « c'est une grande première » sur de telles surfaces (150m²), d'autant plus qu'il s'agit, pour ce projet, de réutiliser la terre de site excavée dans le cadre du chantier.

Lors de l'échange avec Noé Solsona, gérant de la société Calyclay (cf. annexe n°21), ce dernier explique concernant les épaisseurs de projection possibles ; « C'est très variable et ça dépend du thermicien, mais globalement on peut aller de 4 à 40 cm d'épais avec des renforcements adéquats. On est obligé de

mettre une ossature secondaire en bois à partir de 8cm d'épaisseur pour le terre-chanvre et 12cm pour le chaux-chanvre. Cette ossature est surtout là pour tenir la matière le temps qu'elle sèche. »

Dans le cadre de ce projet, une ossature secondaire est donc réalisée pour pouvoir tenir la matière « terre-chanvre ». De plus, une finition extérieure en enduit à la chaux a été retenue. Afin de gérer l'adhérence de l'enduit sur le terre-chanvre, l'entreprise Calyclay réalisera d'abord un lait de chaux, puis un gobetis, et enfin un enduit (cœur d'enduit et enduit de finition).

L'avantage de cette ITE est d'abord son impact environnemental faible, ainsi que la possibilité de recycler la terre de site excavée dans le cadre du chantier, évitant ainsi un impact environnemental lié à l'évacuation de cette terre.

Lors de l'entretien avec Noé Solsona, la question de projeter un mélange terre-paille plutôt que terre-chanvre a été évoquée. Selon lui, le terre-paille peut être projeté si la paille est broyée. Mais il soulève le point suivant :

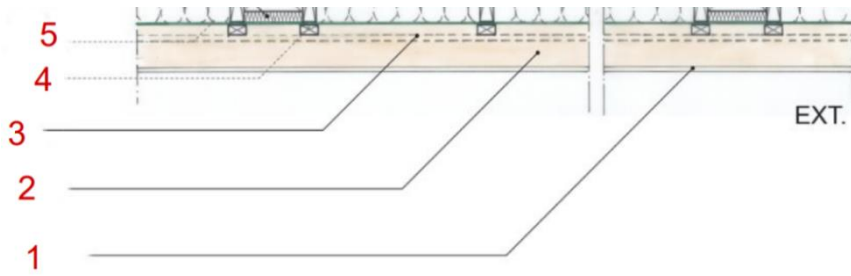
« Il faut comprendre la matière. L'une est une fibre (la paille) et l'autre un granulat (la chènevotte). De ce fait, l'une est fine et l'autre très épaisse. Pour la paille, il faut plus de liant, et donc la performance du mélange sera peut-être moins bonne, et en tout cas, plus d'eau sera ajoutée, ce qui n'améliore pas la problématique de base du séchage ». Car selon lui, le point de vigilance et d'attention principale avec cette technique se porte sur le séchage du matériau.

En imaginant cette solution mise en œuvre contre un mur en pisé, on obtiendrait une continuité parfaite avec une capillarité et une perméabilité à la vapeur d'eau continue en tout point d'une couche à l'autre. De plus, la terre allégée jouerait le rôle d'isolant, tandis que le pisé apporterait l'inertie, pour un confort intérieur maximal. Dans la même logique que le projet Cob bauge, une réflexion pourrait avoir lieu afin de développer cette solution en la rendant plus rentable, notamment en se passant d'ossature, et en optimisant les épaisseurs de chaque couche pour éviter d'arriver à un mur trop conséquent in fine.



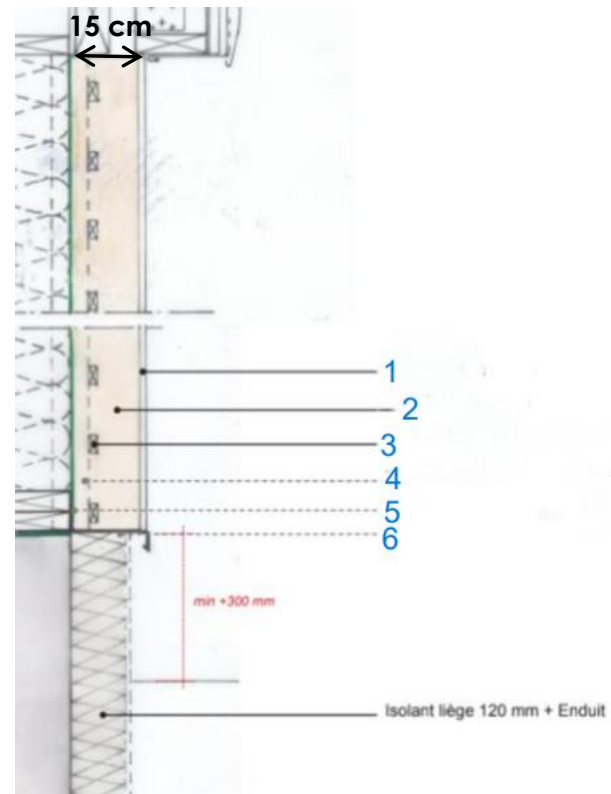
Figure 43; Collège innovant de Béthoncourt, source : CRR architecture

Figure 42 : coupe sur mur et vue de dessus projet Collège de Béthoncourt, source : BE Terre, Martin Pointet



Légende :

1. Enduit chaux, ép 15mm
2. Terre-chaivre projeté ép 150mm
3. Litelage horizontal Bois massif classe 4, dim 20x40mm
4. Tasseaux verticaux BM 60/40 classe 4
5. Pare pluie provisoire phase chantier



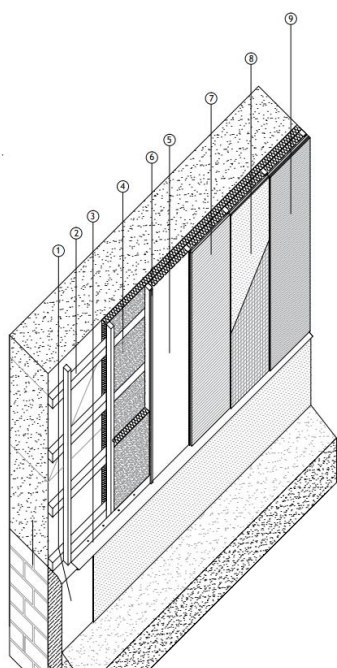
Légende :

1. Enduit chaux, ép 15mm
2. Terre-chaivre projeté ép 150mm
3. Litelage horizontal Bois massif classe 4, dim 20x40mm
4. Tasseaux verticaux BM 60/40 classe 4
5. Pare pluie provisoire phase chantier
6. Bavette métallique

Projet la gaité– Isolation panneaux de paille

Tableau 11: Caractéristiques projet murs isolés en panneaux de paille

Projet	La gaité
Usage	Agricole
Lieu	Notre Dame des landes (partie Est de la ZAD)
Architecte/ maître d'œuvre	NC
Entreprise	Chantier participatif – Produits Copano
Maître d'Ouvrage	NC
Date de livraison	En cours de réalisation, ITE réalisée au printemps 2023
Nature des murs	Murs en bois existants
Remarques spécifiques	Chantier test
Quels murs isolés	Tous
Type d'isolation	Ossature secondaire en bois reprise sur la charpente + deux couches croisées de copano ⁵⁴
Epaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	Panneau de 11,5cm d'épais, lambda de 0,047 W/m.k. Mis en œuvre en deux couches, total 23 cm, R= 4,8 m ² K/W
M2 d'isolant	NC
Cout de l'isolation	Chantier participatif donc prix de pose inférieur
Finition extérieure	Enduit chaux



Isolation thermique extérieure avec ossature bois rapportée.

1. Pose de panneaux de liège avec un enduit armé d'une toile minérale et enduit de finition.
2. Ossature bois horizontale (6 x 8 cm) et verticale (4 x 6 cm).
3. Bavette métallique.
4. Isolation thermique type laine de bois ou ouate de cellulose projetée.
5. Pare-pluie.
6. Contre-latte verticale.
7. Support d'enduit (lattis, cannisses, Fibralith...).
8. Corps d'enduit armé d'une toile minérale ou végétale.
9. Enduit de finition.

Ce projet est un chantier-test pour le nouveau produit « Copano ». Il s'agit du premier panneau isolant en paille. Il se met en œuvre sans colle et est confectionné par couture à sec et à froid. Tout comme la botte de paille, il est prêt à enduire et présente même la particularité de nécessiter une épaisseur d'enduit amoindrie par rapport à la botte de paille.

D'une épaisseur de 11,5 cm, il se met en œuvre comme les laines déroulées en deux couches croisées. La résistance thermique obtenue est très intéressante, tout comme son impact environnemental (bien qu'un transport soit nécessaire pour acheminer le panneau, contrairement à la botte de paille disponible partout en campagne). De plus, sa facilité de mise en œuvre (plus léger qu'une botte de paille) en fait un vrai matériau d'avenir, autant pour de l'auto construction que pour des chantiers à grande échelle. **On pourrait l'imaginer mis en œuvre dans le cadre de l'isolation par l'extérieur de murs en pisé.**

Le détail de mise en œuvre de ce produit s'apparente au détail suivant que l'on retrouve dans le livre « réhabiliter le pisé ».

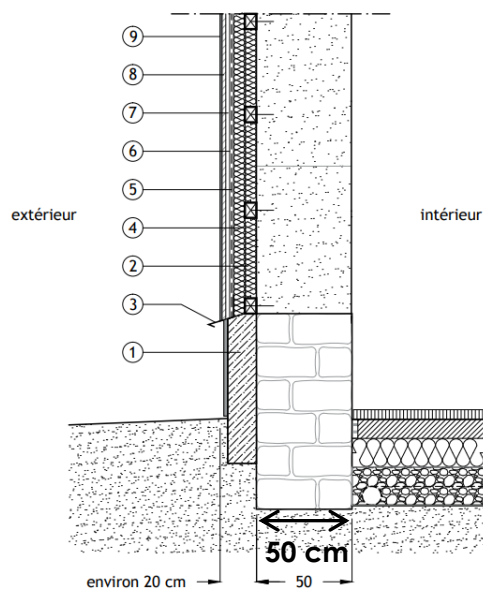


Figure 44: dessins : Mathilde Beguin, Ouvrage : réhabiliter le pisé, isolation thermique extérieur avec isolation rapportée, auteur : CRAterre, Sébastien Moriset, Thierry Joffroy, Guillaud Hubert, Pointet Martin, Arnaud Misse

⁵⁴ 'Panneaux copano', COPANO <<https://www.copano.fr>>.



Figure 45 Image correspondant au chantier de rénovation d'une maison dans l'Aveyron avec Copano (même technique d'isolation que pour le projet la gaiété), source : site internet Copano

Projet « la recette » - isolé en chaux- chanvre banché⁵⁵

Tableau 12 : Caractéristiques projet murs pisé isolés chaux chanvre banché

Projet	La recette, transformation d'une porcherie rénovée
Usage	Habitation + local profession libérale au RDC
Lieu	Chavornay
Architecte/ maître d'œuvre	Madeleine architectes ⁵⁶
Bureaux d'études	NC
Entreprise	Atelier participatif
Maître d'Ouvrage	Particulier
Date de livraison	NC
Nature des murs	Murs existants en parpaing
Remarques spécifiques	
Quels murs isolés	Murs existants au RDC isolés en chaux-chanvre. Extension R+1 isolé d'une autre façon.
Type d'isolation	Chaux-Chanvre tassé dans des banches avec ossature secondaire en bois (faible section) fixé contre mur existant
Epaisseur d'isolant/ Résistance thermique de l'isolant	NC
M2 d'isolant	NC
Cout de l'isolation	NC
Finition extérieur	Pas d'enduit le chaux chanvre est laissé apparent

Ce projet de réhabilitation d'une porcherie présente un matériau chaux-chanvre « à nue ». Le mariage du minéral et du végétal est ici complètement affirmé, et de loin, on pourrait deviner les couches tassées de chaux-chanvre, tout comme on devine les couches dans le pisé. En se passant de l'enduit à la chaux, l'architecte laisse apparaître ces lignes et propose une solution esthétique « semblable au pisé », tant convoitée dans les architectures contemporaines. Néanmoins, il serait intéressant de se rapprocher davantage d'artisans pour connaître les retours d'expérience de cette mise

en application du chaux-chanvre sans enduit. En effet, dans les règles professionnelles, il est clairement indiqué qu'un enduit chaux doit être mis en œuvre pour limiter la pénétration d'eau de pluie, notamment.

Les murs existants du RDC ont été isolés en chaux-chanvre tassé dans des banches avec une petite ossature secondaire qui permet le maintien du chaux chanvre contre le mur existant (évite tout basculement). En comparaison au chantier de marché public « le foyer » présenté ci-avant dans le mémoire, l'ossature mise en place ici semble moins conséquente et uniquement verticale. Cela peut s'expliquer par des exigences supérieures dans le cadre de marchés publics notamment. Le lien vidéo ci-après permet d'avoir une bonne idée du fonctionnement de chantier et de l'isolation chaux-chanvre entre banches : <http://mdl.org/chavornay>

Cette technique me paraît tout particulièrement intéressante car elle est réalisable en chantier participatif, à l'inverse de la technique de projection qui nécessite une machine spécifique. En se passant de machine spécifique, cette technique semble accessible à tout maçon qui souhaite travailler des matériaux bio-géo sourcés. De plus, les règles professionnelles « construire en chanvre » proposent des références de couples chènevotte et liant chaux appropriés, ainsi que des conseils avisés. Il n'y a donc que peu de risque technique quant à l'emploi de cet isolant, en comparaison à la terre allégée, où il est nécessaire de caractériser la terre pour l'utiliser. Cependant, l'utilisation de la chaux n'en fait pas un matériau à impact écologique aussi faible que la paille ou la terre.

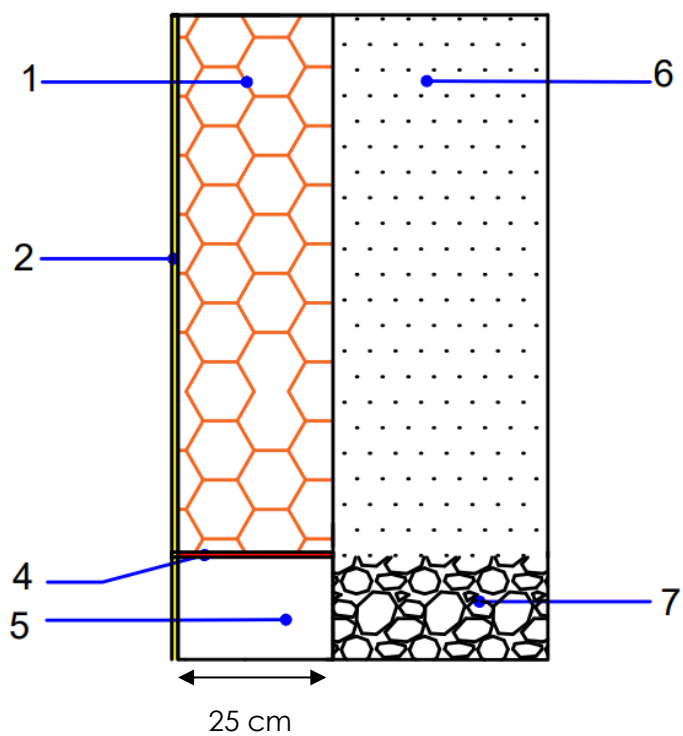
⁵⁵ *La Recette*, dir. by Antoine Beguin, 2023 <<https://vimeo.com/816955239>> [accessed 19 October 2023].

⁵⁶ MADELEINE ARCHITECTES, 'Projet La Recette' <<https://mdl.org/chavornay>>.

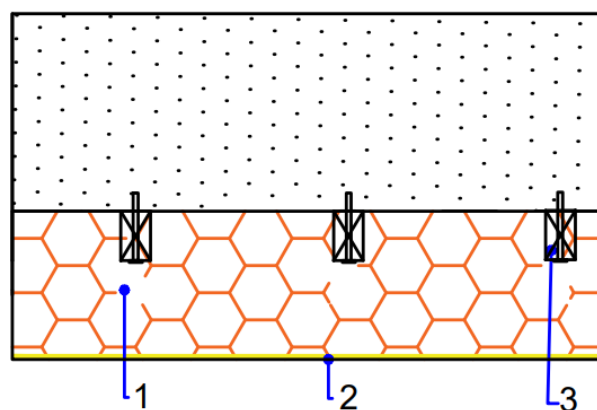


Figure 46: Projet "la recette", source : site internet madeleine architectes, crédits photos : séverin Malraux et madeleine architecte

Coupe sur mur



Vue de dessus



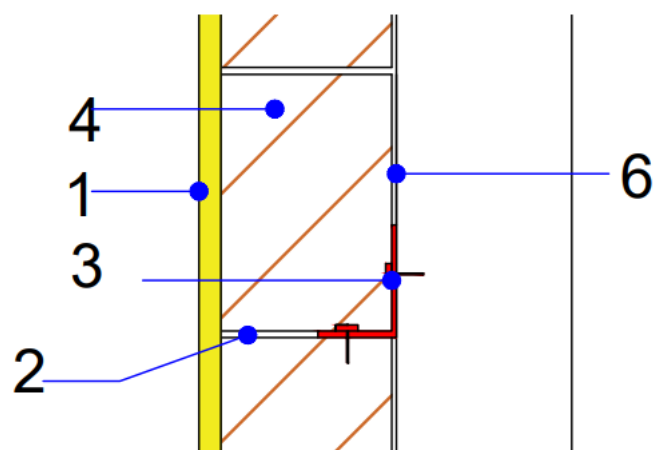
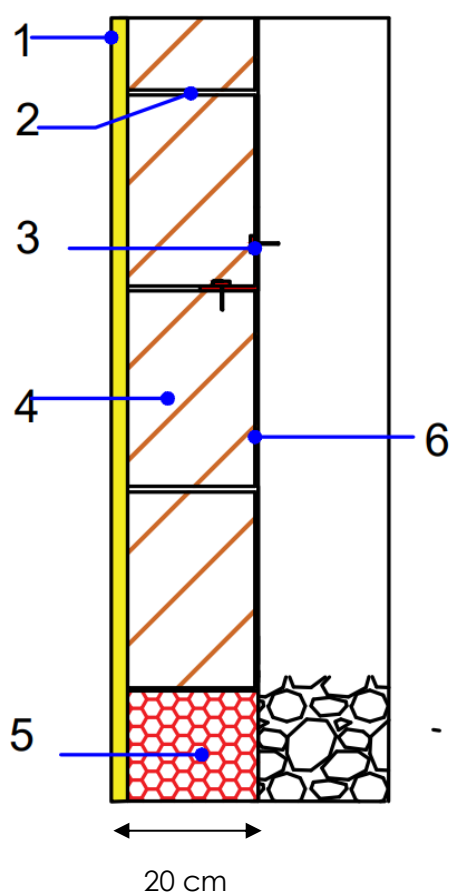
Légende :

- 1 : Chaux-chanvre tassée entre banches
- 2 : Enduit chaux
- 3 : Ossature bois verticale reprise dans mur porteur
- 4 : Rupture de capillarité
- 5 : Isolant imputrescible
- 6 : Mur porteur
- 7 : Sous bassement

Rénovation d'une maison – Isolation par l'extérieur en bloc de chaux chanvre collé⁵⁷



Figure 47: Rénovation d'une maison à Veeneendaal (NL), source : site internet ISOHEMP



Légende :

- 1 : Enduit chaux
- 2 : Mortier colle 3 mm
- 3 : Fixation/ Equerres pour maintien du basculement
- 4 : Bloc de chaux-chanvre
- 5 : Isolant pour sous bassement
- 6 : Mortier colle 3 mm et Coullis chaux- chanvre pour reprise d'aspérités et combler vide

⁵⁷ isoheмп, 'Rénovation - Isolation par l'extérieur - Veeneendaal (NL)', *IsoHemp - Construire et isoler durablement en blocs de chanvre*, 2019

<<https://www.isoheмп.com/fr/reference/renovation-isolation-par-l-exterieur-veeneendaal-nl>>.



Figure 48 : Noé Solsona

Après 10 ans dans la construction paille il se concentre aujourd'hui sur les enduits et isolants à base de terre et de chaux, Société Calyclay, projection chaux-chanvre et terre-allégée



Figure 49 : Luc Van Nieuwenhuyze,

Formateur expert bâti ancien, engagé au sein de la confédération Construire en Chanvre, artisan spécialiste du béton de chanvre



Figure 50 : Julien Cerri,

Charpentier et constructeur paille, société l'atelier du bois, formateur pro-paille et co-auteur des règles professionnelles en paille

D. Synthèse des interviews de trois artisans (avis, Rex et freins)

Durant mon expérience chez Amaco, j'ai eu l'occasion, avec plusieurs collègues, de mettre en place la formation d'une semaine « isoler en bio géo sourcé » à destination d'ingénieurs, architectes, entreprises et intervenants dans le secteur du bâtiment. Cette formation permet d'aborder pendant une semaine l'ensemble des matériaux et solutions existantes en isolation bio-géo sourcé non manufacturée, tant pour de l'ITI que pour de l'ITE. Nous avons co-pensé cette formation avec mes collègues et cherché à repérer des personnes « ressources » pour chaque thématique. C'est donc naturellement, dans le cadre de ce mémoire, que je me suis tournée vers ces mêmes personnes ressources afin de les interroger sur leurs pratiques en termes d'isolation par l'extérieur sur des murs en terre crue (*interviews annexe 19 à 21*).

Ces spécialistes sont ;

- Noé Solsona, entreprise Calyclay, projection de chaux chanvre et terre allégée
- Luc Van Nieuwenhuyze, fédération construire en chanvre : spécialiste du béton de chanvre
- Julien Cerri, RFCP réseau français de la construction paille (travail notamment sur les règles professionnelles), Charpentier constructeur en paille, L'atelier du bois.

Synthèse des interviews

Pour l'ensemble des spécialistes interrogés, l'ITE semble pertinente pour isoler un mur en terre. Julien Cerri a isolé sa propre habitation en pisé en ITE paille. De plus, comme le souligne Luc Van Nieuwenhuyze concernant la pertinence de l'ITE ; « *Cette solution permet d'accroître la résistance thermique du mur tout en gardant les bénéfices de la terre du côté intérieur* ».

Les entretiens mettent en lumière les caractères expérimentaux de ces techniques non réglementées et le peu de retours d'expériences répertoriés avec ces techniques. Ce qui explique en partie la réticence des bureaux de contrôle notamment. En effet, ni l'ITE paille, ni la projection de terre-chanvre ne sont aujourd'hui régis par des règles professionnelles. Comme l'annonce Julien Cerri, les règles pro paille sont en cours de rédaction pour la mise en œuvre en ITE. Ces techniques sont donc répertoriées comme « non courantes » pour la paille et la terre allégée. De plus, comme le dit Luc Van Nieuwenhuyze « il n'y a que peu d'exemple ou retour d'expérience pour des ITE sur maison en terre crue ». Enfin, comme le souligne Noé Solsona, la mise en œuvre de terre-chanvre par projection en ITE sur les projets est encore anecdotique. Le projet du collège de Béthoncourt est d'ailleurs pour lui un « *premier gros chantier en isolation extérieure en terre allégée* ».

De plus, ces interviews ont permis de souligner un frein scientifique au développement de ces techniques. **En effet, il manque encore de recul et d'études concernant la réponse des matériaux bio-géo sourcés à un fort taux d'humidité**, notamment lors de la phase de séchage. Très justement, Noé Solsona souligne le point d'attention suivant « Pour la terre ce n'est

pas la tenue mais le séchage le problème ». De plus, Luc Van Nieuwenhuyze évoque la réticence des bureaux de contrôle à ce sujet « Leur principale crainte c'est que ça pourrisse ».

Les réponses des artisans laissent penser que la solution projetée permet un gain de temps et est moins coûteuse en comparaison aux solutions banchées, comme le souligne notamment Luc Van Nieuwenhuyze ; « *On va plus souvent vers la projection car avec le banchage c'est plus long, il faut gérer des échafaudages et bouger les banches, donc c'est moins rentable et plus complexe à réaliser. Mais la projection implique d'investir dans une machine.* ».

Les entretiens ont permis de clarifier des attentions à porter à la conception et mise en œuvre de ces solutions bio-géo sourcées :

Une épaisseur d'enduit minimale à la chaux est à observer pour supprimer les infiltrations d'eau de pluie dans le complexe isolant et éviter justement la putréfaction (que ce soit avec la paille, la terre allégée ou le chaux-chanvre). Luc Van Nieuwenhuyze préconise un enduit suffisamment épais ; « *L'enduit chaux sur 2 ou 2.5 cm permet de conserver une forte perméance à la vapeur d'eau mais que l'eau liquide ne puisse pas passer* ».

Concernant les ossatures et les épaisseurs, il semblerait qu'il soit possible de réaliser de grosses épaisseurs à condition d'adapter l'ossature secondaire. Noé Solsona évoque des enduits pouvant aller jusqu'à 40cm. La question du séchage pose tout de même question notamment pour de grosses épaisseurs.

Récapitulatif

Les interviews sont venues capitaliser et compléter les éléments obtenus à travers les textes et les ouvrages de référence, et ont permis d'observer différents regards et visions. Les échanges ont confirmé l'intérêt porté à l'isolation par l'extérieur et ont mis en avant quelques points d'attention, précaution et blocage pour ces différentes mises en œuvre (humidité, réglementation, règles de mise en œuvre...).

4.ANALYSE



Mur trombe en pisé, façade pignon du centre d'interprétation
du patrimoine archéologique, Dehlingen, Alsace, Nunc
Architecture

A. Analyse des freins et leviers à la réalisation d'une ITE sur un mur en pisé

Alors que l'ITE est la solution la plus performante, comme démontré dans la première partie de ce mémoire, on peut se demander ; **comment se fait-il que cette solution soit si peu utilisée (constat réalisé suite aux échanges avec les artisans, architectes et des acteurs de projet en terre crue) ?**

Comme l'a mentionné Luc Van Nieuwenhuyze dans son interview, l'un des freins à la réalisation des ITE sur les murs en pisé est **esthétique**. En effet, dans le cadre de beaucoup de projets contemporains en pisé (plus coûteux qu'une solution plus conventionnelle), on retrouve la volonté d'avoir un pisé extérieur « apparent ». L'aspect esthétique prime souvent sur les arguments purement de performance. *Il me semble qu'un des leviers à cela serait de prouver ces aspects de performance thermique et hydrique, appuyés sur des recherches scientifiques, afin d'offrir un argumentaire solide aux maîtres d'œuvre et praticiens pour défendre la mise en place d'ITE dans les projets.*

On note également une crainte vis-à-vis de la **durabilité** des isolants bio-géo sourcés mis en place en extérieur (intempéries, remontées capillaires...). Les recherches dans le cadre de ce mémoire soulignent une réticence des bureaux de contrôle, notamment vis-à-vis de la capacité de l'enduit à protéger correctement ces isolants pour éviter la putréfaction. *Un des leviers à ces questionnements serait de réaliser des essais pour tester la durabilité dans le temps de complexes bio-géo sourcés enduits à la chaux et d'étudier les phases de séchage des terres allégées et bétons végétaux.* De plus, la bonne conception architecturale constitue également une réponse à ces craintes. La diffusion des formations d'architectes, de concepteurs et de bureaux d'études semble être également une réponse à apporter à ce frein. Comme le rappelle Erwan Hamard (chercheur à l'université Gustave Eiffel) lors du PNterre 2023 ; « la durabilité du matériau terre n'est pas seulement lié aux qualités intrinsèques

du matériau mais est aussi liée à la conception architecturale qui va protéger ce matériau ».

De plus, l'aspect **financier** et plus coûteux d'une ITE vis-à-vis d'une ITI constitue le dernier frein à la réalisation d'isolation par l'extérieur. *Il semble intéressant de chiffrer les gains financiers liés à des économies de chauffage et les gains de confort apportés aux occupants par une ITE vis-à-vis d'une ITI afin de contrebalancer le surcoût financier lié à la réalisation de l'ITE.*

B. Analyse des complexes bio-géo sourcés du corpus et pertinence, analyse des freins et leviers scientifiques

Cette analyse a été réalisée afin de répondre à la question suivante ; **quels complexes semblent les plus pertinents en termes d'isolation par l'extérieur pour des murs en pisé ?** Pour cette analyse, les solutions du corpus étudiées seront comparées, les complexes de murs pertinents seront mis en avant, les verrous seront soulignés et les premières approches scientifiques permettant de lever les freins repérés seront évoqués.

L'analyse du corpus de projet sera faite autour de 4 critères :

- Critère 1 : Matérialité (aspect esthétique)
- Critère 2 : Impact environnemental (Provenance des matériaux, transformation)
- Critère 3 : Perméabilité et capillarité (aspects physiques des matériaux)
- Critère 4 : Mise en œuvre et performance thermique

1. Matérialité

Dans le corpus de projet étudié, on retrouve deux types de finitions pour des murs isolés par l'extérieur ; la mise en œuvre d'un bardage ou l'application d'un enduit perspirant. Bien que le projet « la recette » ne présente pas de finition sur le matériau « chaux-chanvre tassé », il semble tout de même nécessaire d'appliquer un enduit protecteur comme indiqué par Luc

Van Nieuwenhuyze lors de son interview (Annexe n°19),

La finition par enduit permet de conserver un aspect monolithique, massif et minéral du bâti. De plus, l'enduit à la chaux est déjà existant sur bon nombre de bâtisses du patrimoine en pisé. **Les solutions de complexes isolants en bio-géo sourcé permettant l'application d'un enduit extérieur me semblent les plus pertinentes, c'est le cas des solutions en fibre de bois, paille, terre allégée, et chaux-chanvre.** En effet, ces solutions permettent de conserver une bonne intégration architecturale au sein du bâti existant.

Verrous, questionnements et approche

« Etudier la durabilité du matériau terre-allégée. »

Suite à un échange avec Martin Pointet, celui-ci questionne la mise en œuvre de la terre allégée en extérieur et la qualité de l'enduit à appliquer pour protéger correctement le matériau, et de ce fait, éviter les entrées d'eau au sein du complexe. En effet, lorsqu'on recherche à avoir un matériau en terre allégée avec un fort pouvoir isolant, la quantité de terre mise en œuvre est minimisée. De ce fait, les liaisons argileuses qui interviennent entre la terre allégée et le pisé seront moindres. C'est pourquoi, le peu de liaison subsistant ne doit surtout pas être altérées par une forte présence d'eau. Il semble donc primordial de vérifier le caractère protecteur de l'enduit à la chaux pour une isolation de type terre allégée et béton de chaux.

Afin de lever les freins repérés, les questions suivantes doivent être étudiées par le biais d'une approche scientifique et d'essais de laboratoire : L'enduit chaux est-il suffisamment protecteur pour éviter toute putréfaction ? Comment va se dérouler la phase de séchage ? Comment va évoluer le matériau dans le temps ? Cette étude permettrait d'évincer les craintes liées à la durabilité du matériau qui constituent des freins au développement de cette technique.

2.Impact environnemental

Parmi les techniques d'isolation référencées dans le corpus, certaines font appel à des produits manufacturés (avec acheminement sur

chantier), tandis que d'autres techniques mettent en œuvre des produits naturels locaux. Selon moi, la priorité à des matériaux locaux est importante, car bien que biosourcés, les matériaux comme la fibre de bois, le bloc de chaux-chanvre, les panneaux de paille tissés ou encore la laine de chanvre doivent parcourir la France pour être acheminés sur chantier, ce qui n'est pas cohérent avec la recherche d'un impact environnemental minimum. A l'inverse, les matériaux à base de paille et de terre sont des ressources locales issues du réemploi, ce qui leur confère notamment un impact carbone nul lié au transport.

De plus, parmi les matériaux référencés bio-géo sourcés, certains sont transformés par des procédés industriels ou de cuisson, qui sont des procédés énergivores. A l'inverse, les matériaux naturels issus du réemploi (co-produit d'agriculture, réemploi de terres excavées...), ne nécessitent aucune transformation industrielle, c'est le cas de la paille, du chanvre ou des matériaux à base de terre crue. En effet, isoler en paille émet 6 fois moins et stocke deux fois plus de CO2 que le chaux-chanvre par exemple (base KBOB). De plus, utiliser la terre crue évite un impact environnemental lié à l'évacuation des terres de chantier excavées.

Pour ces raisons, l'analyse de cycle de vie des matériaux en paille, en chanvre et en terre crue sont donc exemplaire et font de ces matériaux un premier choix écologique, il me semble donc très pertinent d'isoler avec ces matériaux.

Verrous, questionnements et approche

« Etudier les Analyses de cycle de vie des matériaux terre et pouvoir les généraliser malgré la pluralité des mises en œuvre et la variabilité de la ressource existante. »

Un des freins scientifiques au développement de ces techniques est l'exactitude des fiches FDES renseignées. En effet, comme l'a indiqué Laurent Cheveau, co-gérant d'Ecozimut, lors de notre échange au sujet du projet « carré flore » ; « les FDES des BTC ont jusqu'à maintenant jouées en leur défaveur ». En effet, réalisées avec des hypothèses défavorables, ces dernières ne permettaient pas de valoriser à sa juste valeur le matériau.

Pour lever ce verrou scientifique, l'axe « analyse de cycle de vie » du PNTerre prévoit une analyse fine pour comparer à juste titre les matériaux

terre aux matériaux plus conventionnels en les comparant selon un contexte d'usage notamment. Cette étude permettra donc de mettre en valeur l'impact environnemental faible de ces produits, et donc de les insérer plus facilement dans les projets (objectif RE2020 de calcul des ACV des matériaux employés).

Pour établir une ACV il faut définir le processus de fabrication, les distances parcourues, les engins utilisés, etc. Cette étude d'analyse de cycle de vie des matériaux soulève donc la question suivante : Comment faire pour utiliser une ressource locale non normée ayant une grande variabilité (qualité, transformation, approvisionnement...) ?

3.Continuité physique : Perméabilité et capillarité

Certains complexes isolants ne permettent pas une continuité capillaire et hygroscopique de par les propriétés physiques des matériaux mis en place, c'est le cas des complexes à base de panneaux de liège ou encore des complexes présentant une lame d'air entre le mur et l'isolant notamment. Les complexes et isolants permettant une continuité capillaire, thermique et hydrique me semblent être plus pertinents afin de conserver les bénéfices et le confort apporté par le matériau pisé.

De plus, certaines mises en œuvre permettent d'isoler en absorbant toutes les discontinuités du mur existant, c'est le cas des bétons végétaux et des terres allégées banchées ou projetées ainsi que de l'isolation par insufflation de fibre en vrac. Ces isolants semblent intéressants à utiliser car ils ne nécessitent aucune reprise d'imperfection du mur existant et ne laissent apparaître aucune lame d'air, ce qui minimise les risques de condensation. Dans le cas de mise en œuvre de bloc préfabriqué, comme souligné par Luc Van Nieuwenhuyze, il sera nécessaire d'apporter une attention particulière à la mise en œuvre. En effet, il est nécessaire de combler le vide entre l'isolant collé et le mur pisé pour ne pas laisser apparaître de lame d'air.

Verrous, questionnements et approche

« Optimiser le complexe par l'emploi de l'isolant le plus performant en termes d'échange avec le pisé »

Parmi les matériaux hygroscopiques et capillaires appliqués contre un mur en pisé, on pressent que les échanges seront d'autant plus performants si une continuité physique type « terre-terre » ou « terre-chaux » est en jeu. Ce point sera à valider ou invalider lors d'expérimentation en laboratoire notamment. Pour répondre aux questions concernant les échanges capillaires et hydriques de différents complexes de paroi, il serait intéressant de comparer ces échanges dans le cadre d'une isolation chaux-chanvre, terre-chanvre et d'une isolation par voie sèche type paille. Cela permettrait de définir quel complexe est le plus favorable en termes de confort apporté à l'habitant. Il serait éventuellement pertinent de comparer cela à une isolation type « plus courante » comme l'isolation en laine de bois.

« Étudier le cas des doubles murs en pisé, pour optimiser les échanges par l'emploi d'isolant perspirant »

Pour améliorer les échanges hydriques et capillaires des doubles complexes en pisé (actuellement isolés par des matériaux perméables type verre cellulaire et liège), il serait intéressant d'étudier à l'échelle une le comportement de ces parois. En effet, le choix des isolants imputrescibles pour ces projets a été guidé par la peur d'apparition de condensation dans la paroi. En évinçant ce risque, on pourrait alors isoler ces parois avec d'autres isolants perméables et donc permettre des échanges hydriques et capillaires plus intéressants avec le matériau pisé.

« Etudier la faisabilité d'une réalisation « chaux-chanvre » préfabriqué sans laisser apparaître de lame d'air »

Pour répondre aux questions concernant l'isolation avec des blocs de chaux-chanvre préfabriqués, il semble intéressant également d'étudier ce complexe à l'échelle 1. En effet, cela permettrait de répondre aux questions suivantes : le coulis réalisé derrière le bloc préfabriqué permet-il de combler l'ensemble de la lame d'air ? Des effets de condensations apparaissent-ils dans un tel mur ?

« Étudier l'impact des fibres concernant les échanges hydriques dans le cas particulier de la terre allégée »

De plus, dans le cadre d'une isolation en terre allégée, il semble intéressant d'étudier l'impact des différentes fibres utilisées dans un mélange. En effet, il semble important de comprendre comment ses dernières vont influencer les échanges hydriques et thermiques qui interviennent entre la terre allégée et le pisé et également jouer sur la durabilité du matériau. Cette étude permettrait de cibler les fibres qui semble les plus pertinentes pour un usage en terre allégée sur la base d'une analyse multi critère (durabilité, capillarité, hygroscopicité, mise en œuvre...). Une Review d'Aurélie Laborel « Plant Aggregates and Fibers in Earth Construction Materials » donne déjà un premier aperçu des recherches scientifiques existantes à ce sujet afin de pouvoir poursuivre les investigations sur cette thématique en laboratoire.

4. Mise en œuvre et performance thermique

Épaisseur de mur (ce critère est en lien direct avec la performance thermique)

Dans le corpus étudié, les épaisseurs de complexes varient en fonction de la conductivité du matériau isolant. Les isolants bio-géo sourcés (béton végétal ou terre allégée) ont une conductivité thermique plus élevés que les isolants biosourcés. De ce fait, la mise en œuvre d'un isolant bio-géo sourcé entraîne la réalisation d'un complexe de mur d'épaisseur conséquente pour atteindre une résistance thermique correct. Si l'on veut minimiser l'épaisseur total du complexe de mur, il semble donc pertinent d'isoler avec un matériau biosourcé (ouate de cellulose ou fibre de bois, par exemple) plutôt qu'un matériau bio-géo sourcé.

L'ossature

La plupart des systèmes d'isolation étudiés dans le corpus présentent des ossatures secondaires en bois. Certains projets intègrent une ossature simple verticale, tandis que d'autres mettent en œuvre une double ossature plus conséquente. Comme mentionné par Luc van Nieuwenhuyze (annexe n°19), il semble essentiel de mettre en œuvre une ossature afin d'éviter tout

basculement de l'isolant rapporté dans le cas du chaux-chanvre projeté ou banché, c'est aussi le cas pour l'isolation en terre-allégée. La mise en œuvre de cette ossature est une complexité technique supplémentaire ajoutée à celle de la mise en œuvre du pisé et de son isolant.

Dans le corpus, deux exemples de mise en œuvre par collage sont présentés et ne contiennent pas d'ossature. C'est le cas de l'isolation par application de panneaux de roseau et de la mise en œuvre de blocs préfabriqués en béton végétale (possible aussi avec les panneaux de fibre de bois). Les deux solutions qui permettent de se passer d'ossature semblent pertinentes, bien qu'une attention particulière soit à apporter pour la mise en œuvre des blocs préfabriqués de chaux-chanvre afin de combler le vide entre le bloc et le mur existant pour ne pas laisser apparaître de lame d'air notamment.

La coordination à la mise en œuvre

Comme l'a souligné Martin Pointet lors de notre échange, la mise en œuvre de béton végétal ou de terre allégée pour isoler permet de n'avoir à faire qu'à un seul corps d'état (souvent le même que celui qui réalise le pisé). Tandis qu'une réalisation d'un mur en pisé avec ossature secondaire et laine végétale fait intervenir 2 à 3 corps d'état différents. Plus il y a de corps d'état, plus il y a de coordination à gérer et plus la mise en œuvre est complexifiée. En termes de gestion de chantier la solution d'isoler un mur en pisé en béton végétal ou terre allégée semble faciliter la coordination des interventions.

Temps de mise en œuvre

Après échanges avec Noé Solsona, Luc Van Nieuwenhuyze et étude du corpus de projets, les systèmes d'isolation par projection semblent être les plus « rapide » à mettre en œuvre. En revanche, ce système demande un investissement pour l'achat de la machine ce qui n'est pas adapté aux chantiers en auto-construction notamment.

De plus, dans le cadre de projet en auto-construction (comme celui de l'isolation en paille ou le projet « la recette » en chaux-chanvre banché, présentés dans le corpus de projets), les techniques d'isolation par voie sèche semblent plus rapides à mettre en œuvre

qu'un béton végétal banché. Bien souvent, le rendement de ces techniques est meilleur et aucun séchage n'est à prévoir. **L'isolation en paille semble donc très pertinente pour une isolation de mur en pisé dans le cadre d'une rénovation notamment.**

Coût

Les coûts bruts des matériaux bio et/ ou géo sourcés varient en fonction des fournisseurs et des entreprises, mais ils sont souvent supérieurs aux matériaux plus conventionnels. Cependant, à titre d'exemple, l'isolation représente seulement 1% du coût final d'un projet de construction. En outre, les matériaux biosourcés ont un coût dérisoire eu égard à leurs performances thermiques, hygrométriques et acoustiques. De façon générale, les isolations type ouate de cellulose et laine de bois/fibre de bois sont moins coûteuses qu'une mise en œuvre d'un béton végétal. Selon moi, le caractère non local de ces matériaux prime sur la question du coût, et il me semble plus pertinent d'aller vers les matériaux les moins impactant d'un point de vue environnemental plutôt que vers les matériaux les moins coûteux dans le cadre de la future recherche.

Verrous, questionnements et approche

« Optimiser les épaisseurs de complexes »

Un des freins à la mise en œuvre de ces isolants semble être l'épaisseur importante du complexe total. Une des approches scientifiques intéressantes serait de travailler à l'optimisation de ces épaisseurs pour éviter d'avoir des complexes de murs de l'ordre de 70cm (comme c'est le cas sur le projet contemporain « le foyer »).

Il semble également intéressant de réinterroger le sens d'un tel complexe. En effet, l'épaisseur finale d'un complexe terre allégée et pisé semble conséquent, de ce fait il serait intéressant de comparer les réels avantages de ce type de complexe par rapport à un complexe porteur en bois avec un remplissage terre allégée afin de valider techniquement et physiquement la cohérence de ce choix.

« Optimiser l'ossature »

Pour répondre aux questionnements concernant l'ajout d'une ossature secondaire en bois, il semble pertinent d'étudier un système

qui se passerait d'ossature et/ou d'optimiser le dimensionnement et la mise en œuvre de ces ossatures secondaires afin de faciliter la mise en œuvre sur chantier et de s'inscrire dans une démarche d'économie de matière

« Optimiser la mise en œuvre »

Au regard de ces arguments et freins à la mise en œuvre du béton végétal banché pour isoler un mur en pisé, il semble intéressant d'étudier les possibilités de gain de temps pour la mise en œuvre de cette technique.

« Etudier l'optimisation de l'épaisseur de complexe, l'optimisation de l'ossature et de la mise en œuvre qui induira donc une diminution du coût du complexe, dans le cadre d'une réalisation de mur en pisé contemporain isolés en bio-géo sources »

En effet, des réflexions de mise en œuvre dans une même banche (pisé et isolant), comme cela a été fait dans le cadre du projet Cob Bauge avec le matériau bauge, semblent pertinent à étudier et permettrait à la fois une réflexion concernant l'optimisation de l'épaisseur, de l'ossature et de la mise en œuvre.

Temps de séchage du pisé/ du béton végétal

Dans le corpus étudié, les bâtiments contemporains en pisé fraîchement réalisés sont isolés avec des isolants imputrescibles (comme le liège et le verre cellulaire ; complexe non perspirant) ou isolés avec un isolant chaux-chanvre projeté. Nous ne savons pas si l'application du chaux-chanvre projeté dans le cadre du projet « le foyer » est intervenue une fois le mur en pisé sec ou non.

Les isolants biosourcés type fibre de bois ou laine déroulée sont très sensibles à l'humidité, de ce fait un mur en pisé fraîchement réalisé ne peut pas être isolé par un matériau de ce type avant d'être sec. Cependant, selon Martin Pointet, le planning de chantier avec les interventions de nombreux corps d'état absorbe bien souvent ce temps de séchage du pisé. Selon lui, le second œuvre (l'isolation) intervient souvent entre 6 mois et 12 mois après la réalisation du mur en pisé, donc sur un mur sec. Cet argument semble donc intéressant mais non primordial et ne constitue pas réellement un frein à la mise en œuvre des biosourcés contre un mur en pisé.

Verrous, questionnements et approche

Un des enjeux de recherche scientifique me semble être la caractérisation de la phase de séchage et les échanges physiques qui apparaissent au cours de cette phase notamment dans le cas d'une isolation en terre allégée ou chaux-chanvre sur un mur en pisé fraîchement réalisé. En effet, comme l'explique Franz Volhard dans son ouvrage, on observe avec la terre allégée une apparition de champignons lors du séchage du matériau. Aussi, les questions suivantes se posent dans le cas d'un mur en pisé isolé avec ce matériau ; Le phénomène de putréfaction va-t-il être accentué par la présence d'un mur en pisé frais accolé au béton végétal ? Est-il possible de réaliser en parallèle un mur en pisé frais et un isolant bio-géo sourcé comme c'est le cas dans le projet cob bauge ?

Récapitulatif

Au regard de l'ensemble des critères, les complexes de murs qui me semblent les plus pertinents sont ceux à base de paille, de panneaux de roseaux, de terre allégée et de chaux-chanvre.

On remarque que les complexes les plus réalisés permettant l'application d'un enduit sont les complexes avec isolant en fibre de bois.

Les freins majeurs au développement de ces isolations en terre allégée et chaux-chanvre semblent être l'épaisseur totale du complexe (pisé / isolant), les problématiques de durabilité notamment liées au séchage (durabilité), la réalisation d'ossatures secondaires, les réglementations inexistantes pour certaines techniques et le peu de retour d'expérience.

Face à ces verrous, on mesure bien l'importance des réseaux tel que RFCP, construire en chanvre et Asterre notamment pour synthétiser les retours d'expérience et promouvoir ces techniques. La recherche a également un rôle fort à jouer pour contribuer à développer ces mises en œuvre avec des appuis scientifiques solides.

5. ENJEUX DU SUJET DE THESE



Définition du sujet de thèse et choix des isolants à étudier

En démarrant cette thèse, dans la continuité de ce mémoire, je vais avoir la chance de me focaliser durant trois ans sur le sujet de l'isolation par l'extérieur de mur en pisé par le biais de matériaux bio-géo sourcés. Après les premières discussions en interne avec le laboratoire du LOCIE, les isolants qui étaient à l'origine pressentis à être étudiés dans le cadre de thèse sont les **terres allégées et le chaux-chanvre**. Des premières hypothèses ont été réalisées en amont par les porteurs de ce projet concernant l'amélioration des performances du pisé par une telle isolation. Le déroulé de ma thèse permettra de valider ou non ces hypothèses. En effet, selon le projet PACS+ (comportement multifonctionnel de Paroi complexes géo et biosourcées), dans lequel s'inscrit ma thèse ; *« Le béton végétal, matériau bio-géo sourcé, s'impose comme le candidat naturel pour apporter la correction thermique voulue. L'assembler avec des constructions en pisé constituera une solution à sa faiblesse mécanique reconnue comme un frein à son développement (Amziane 2017). La couche de béton végétal permettra notamment d'améliorer le comportement sous sollicitation sismique de la paroi en pisé. Le composite géo et bio sourcé ainsi construit constituerait une solution hybride multifonctionnelle équilibrée alliant compatibilité mécanique, dynamique de transfert hygrothermique préservée et sobriété voire neutralité carbone. Il s'agit aussi d'investiguer une solution jamais testée pour constituer le support structural du béton végétal »*. Les verrous scientifiques seront donc levés dans un premier temps par une caractérisation des matières et des matériaux à petite échelle, puis dans un second temps par le biais d'études de « murets ». Enfin, une étude à l'échelle de murs est prévue avec des mesures de champs thermiques et hydriques à l'aide de méthodes non destructives ainsi que des mesures et caractérisations mécaniques. L'évaluation des effets de l'isolant sur la performance globale, à la fois énergétique et structurelle sera également étudiée ainsi que la description du comportement couplé hygrothermo-mécanique notamment à l'interface. Enfin, il semble important en fin de thèse de pouvoir établir une forme vulgarisée de ma recherche afin que cette dernière puisse servir

aux praticiens. En effet, lors de l'AG du PN terre 2023 les praticiens ont soulevé le point suivant ; *« Si nous praticiens, on peut avoir une vulgarisation simple en recto verso des sujets de thèse qu'on peut appliquer dans nos métiers ce serait super car on n'a pas forcément le temps de lire des thèses complètes, dans un vocabulaire éloigné du nôtre et parfois en anglais. C'est important que des moyens soient mis en œuvre pour vulgariser afin que nous, praticiens, puissions s'approprier les sujets. »*

Après les recherches réalisées dans le cadre de ce mémoire, en complément des isolants types béton végétal et terre allégée pressentis à l'étude, il me semble que **le matériau isolant en paille a également toute sa place dans le cadre de cette thèse**. En effet, ce matériau est naturel, de proximité, rapide à mettre en œuvre, disponible en grande quantité et permet la réalisation d'un enduit. Tous les arguments poussent donc à envisager l'étude d'un complexe pisé-paille dans le cadre de cette thèse. **En effet, isoler en paille semble très pertinent dans le cadre d'une rénovation et l'ajout d'une technique d'isolation dite « par voie sèche » avec une conductivité thermique plus faible que celle des bétons végétaux permet la réalisation d'un complexe moins épais pour une résistance thermique donnée.**

De plus, l'isolation par panneaux de roseaux collé permet de se passer d'ossature, il me semble donc pertinent d'étudier également ce matériau et cette mise en œuvre.

Il peut sembler également intéressant de comparer ces complexes avec un complexe plus « standard » qui ne demande pas de savoir-faire particulier comme l'isolation en fibre de bois.

Avis divergent des praticiens au regard du choix de l'isolant

Durant l'AG du PN Terre en octobre 2023, j'ai eu la chance d'échanger avec des praticiens aux avis divergents au regard du choix de l'isolant à mettre en œuvre sur un mur en pisé. Ce qui me pousse à étudier la pertinence de ces différents isolants. En effet, selon certains, l'isolation en terre allégée est plus pertinente que l'isolation par « voie sèche » car elle permet une meilleure continuité capillaire et donc une évacuation plus performante de l'eau sous forme liquide

accumulée dans la paroi. De plus, ces mêmes praticiens m'alertait concernant les isolants type biosourcés permettant une isolation « trop performante » (avec une résistance thermique élevée), car selon eux, en cas de défaut, la grande différence de gradient de température en ce point risque de laisser apparaître de lourdes pathologies avec comme conséquence, le pourrissement de l'isolant. A l'inverse, d'autres praticiens étaient d'accord pour dire qu'une isolation par voie sèche semble la plus pertinente car elle isolera mieux qu'un béton végétal et nécessitera une épaisseur amoindrie et une mise en œuvre simplifiée tout en conservant une continuité capillaire et hydrique.

Enjeux rénovation et neuf sur les assemblages

A la lecture du sujet de recherche, il semble que les **enjeux soient différents pour une recherche dans le cadre d'une rénovation et pour une construction contemporaine.**

Dans le cadre d'une rénovation, il semble que l'enjeu soit plutôt tourné vers le choix de l'isolant et sa mise en œuvre, avec l'idée d'optimiser l'isolation par la mise en œuvre de l'isolant le plus pertinent. L'idée serait donc d'étudier les isolants paille, terre allégée et chaux-chanvre afin de comparer les complexes en termes d'échange thermiques et hygrothermiques dans le cadre d'une rénovation. De plus, il semble intéressant d'étudier les possibilités offertes par le chaux-chanvre sous sa forme préfabriquée et de comparer cette solution à la mise en œuvre banchée. La comparaison des échanges hygrothermiques apportés par ces isolants avec une solution de référence (type fibre de bois) me semble également pertinente afin d'avoir un point de comparaison qui se rapproche d'une technique plus « courante ».

Dans le cadre d'un mur neuf, il semble que l'enjeu soit plutôt tourné vers l'amélioration de l'assemblage et du complexe. En effet, l'idée est d'aller vers un ou des matériaux « innovants », isolants et porteurs afin de faire du matériau vernaculaire en pisé un matériau d'avenir qui réponde aux enjeux des dernières réglementations. Une réflexion sera à mener afin de faciliter la mise en œuvre, d'optimiser le temps de mise en œuvre, d'optimiser l'épaisseur finale du mur et d'aller vers de l'économie de matériaux en supprimant notamment l'ossature

secondaire. Une première piste de réflexion avec la réalisation du mur porteur et de l'isolant dans une même banche (dans la même logique que le projet Cob Bauge mais avec le pisé), semble effectivement pertinente. Une attention à la phase de séchage sera à apporter. Une étude de faisabilité sera à réaliser afin de créer un matériau sandwich « innovant » composé de pisé et d'isolant bio-géo sourcé.

Dans le cadre de cette recherche, **plusieurs assemblages seront testés.** Des assemblages pertinents dans le cadre de réhabilitation semblent être les suivants ; briques préfabriquées et collées, réalisation banchée, réalisation projetée, paille dans ossature ou mise en œuvre selon la technique des bretelles. Dans le cadre du bâtiment contemporain, des assemblages innovants avec une réflexion de mise en œuvre du pisé et de l'isolant dans une même banche semble être pertinente.

En réponse aux enjeux et freins scientifiques soulignés dans ce mémoire, une première grille de lecture comprenant les premières propositions d'assemblages et de matériaux isolants à étudier durant la thèse a été réalisée ci-après ainsi qu'un premier plan d'organisation des réflexions est présenté dans la figure précédente.

Tableau 13 : Premières pistes de réflexions

	Axe de recherche	Enjeux / But de la recherche	Matériaux isolants	Assemblages possibles	Caractérisation mécanique	Caractérisation thermique/hydrrique
Neuf – Pisé frais	Essais mécaniques, thermiques et hydriques Avec zoom sur phases de séchage et questions de durabilité (protection par enduit chaux)	But : optimiser la mise en œuvre d'un pisé isolé en réalisant la mise en œuvre dans une même banche (gain temps, interpénétration des matériaux, suppression de l'ossature bois secondaire) <u>et</u> optimiser la réponse mécanique du matériau innovant créé (et sismique)	Solutions innovantes : Terre allégée	-1/Mise en œuvre in situ dans une même banche en parallèle -2/Mise en œuvre isolant préfabriquée dans la banche et réalisation du pisé dans la même banche	X	X
Rénovation – Pisé (sec)			But : optimiser l'isolation tout en conservant/ optimisant les migrations hydriques de la paroi existante	Chaux-chaivre	-1/ Mise en œuvre préfabriquée : isolation préfabriqué fixation par colle et équerre -2/Mise en œuvre in situ : Ossature secondaire en bois et projection ou réalisation entre banche	X Non
	Terre allégée	-1/ Mise en œuvre préfabriquée : briques préfabriquées fixation par colle ou equerre -2/ Mise en œuvre in situ : Ossature secondaire en bois ou panneaux roseaux et projection Ou réalisation entre banche		X Non	X	
	Paille	-1/ fixation des bottes entre montants bois -2/ Système des bretelles		Non X	X	
	Roseau	-1/ isolation par panneaux de roseaux collé à la terre		X	X	

CONCLUSION



Forte du bagage engrangé ces dernières années par le biais du DSA, des expériences professionnelles, ainsi que des rencontres faites dans le domaine de la construction en terre crue, consciente du chemin à parcourir pour que la pratique de la terre crue se massifie ainsi que de l'intérêt et du rôle qu'a à jouer la recherche dans ce processus, je me sens équipée pour mener à bien la thèse que je démarre en octobre au LOCIE.

Les travaux et recherches réalisés dans le cadre de ce mémoire ont déjà influencé l'orientation des complexes à étudier et mis en lumière des points d'attention supplémentaires. De plus, les questions d'ossature et d'enduit n'étaient pas soulevées dans le sujet de thèse initial, alors qu'elles paraissent essentielles au regard de l'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire. De même, des complexes faisant intervenir une lame d'air avaient été répertoriés comme « la solution actuelle mise en œuvre », or au regard de cette étude et du corpus, il semblerait qu'aucune lame d'air ne soit jamais mise en œuvre dans le cadre d'une ITE (ce qui semble tout à fait cohérent). Ce mémoire constitue donc une base d'appui solide pour la suite de la thèse et m'a permis d'entrer dans le vif du sujet tout en gardant un regard large sur l'ensemble des possibilités qui s'offrent en termes d'ITE avec des matériaux biosourcés et bio-géo sourcés sur un mur en pisé.

La thèse permettra de tester la faisabilité d'un complexe isolant en terre allégée sur un mur en pisé et de caractériser notamment les phases de séchage du matériau. Grâce aux recherches et aux valeurs expérimentales obtenues ainsi qu'aux corrélations scientifiques qui seront établies dans le cadre de cette recherche, elle permettra aux praticiens de justifier plus facilement la mise en œuvre de ces isolants. La recherche permettra également d'apporter un point de comparaison entre ces solutions et les solutions plus « standardisées ». La recherche publique a un rôle central à jouer pour débloquer les freins et permettre la massification de ces techniques isolantes en bio-géo sourcé. D'autant plus que les matériaux en terre crue ne sont pas industrialisés et, de ce fait, trop peu de recherche ne sont réalisées à ce sujet. Je suis donc heureuse de m'inscrire dans cette démarche en intégrant dès octobre le laboratoire du LOCIE à Chambéry dans le cadre

de ma thèse. L'ambition de cette thèse est d'accompagner la mutation de notre manière de construire et de concevoir en permettant aux projets d'intégrer des matériaux à la hauteur des enjeux et exigences environnementale actuelles.

« Entre « haute » et injustement nommée « basse » technologie, de nouveaux métissages sont espérés et déjà se déploient en des éclectismes culturels créatifs et innovants où la terre crue et ses qualités retrouvent une juste place. »

Hubert GUILLAUD, architecte, enseignant-chercheur

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment (France), CTA, and others, eds., *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue*, 2018

Gauzin-Müller, Dominique, Guyet, Claire, Doat, Patrice, Fontaine, Laetitia, Guillaud, Hubert and Duval, Jean-Pierre, *Architecture En Terre d'aujourd'hui* (Museo éditions, 2016)

Gauzin-Müller, Dominique, and Vissac, Aurelie, *TerraFibra architectures* (Paris : Pavillon de l'Arsenal, 2021)

Heitz, Philippe, Morel, Jean Claude, Fabbri, Antonin, Soudani, Lucile, Champire, Florient, and Meunier, Nicolas, *L'isolation du pisé : pertinence et principes* (Vaulx en Velin: ENTPE, 2015)

Le Tiec, Jean-Marie, Misse, Arnaud, Dayre, Michel, Doat, Patrice and Joffroy, Thierry, *Construire en pisé : prescriptions de dimensionnement et de mise en oeuvre* (Antony : Le Moniteur, 2020)

Moevus, Mariette, Fontaine, Laetitia, Anger, Romain, Doat, Patrice, Couvreur, Lucile and Cloquet, Basile, *Projet : Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) : synthèse à destination des responsables des politiques publiques* (Grenoble : CRAterre-ENSAG, 2013)

Moriset, Sébastien, Joffroy, Thierry, Beguin Mathilde, Guillaud Hubert, Pointet Martin, and Misse, Arnaud, *Réhabiliter Le Pisé*, ed. by CRAterre (actes sud, 2018)

Pichon, Quentin, Naumovic, Jean-marc and Construire en chanvre, *Construire en chanvre : règles professionnelles d'exécution* (Paris : SEBTP, 2012)

RFCP, Réseau Français de la construction en paille, *Règles professionnelles construction en paille : remplissage isolant et support d'enduit, règles CP 2012 révisées* (Paris : Le Moniteur, 2014)

Röhlen, Ulrich, and Ziegert, Christof, 'Construire En Terre Crue (Paris : Le Moniteur, 2013)

Volhard, Franz, *Construire En Terre Allégée* (Arles : Actes Sud, 2016)

Thèses

Chabriac, Pierre-Antoine, 'Mesure Du Comportement Hygrothermique Du Pisé' (ENTPE ; CNRS-LTDS, 2014)

Champiré, Florian, 'Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction' (Université de Lyon, 2017)

Lucile, Caroline, Laurence Soudani, 'Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material' (Université de Lyon, ENTPE, 2016)

Études / articles / publications

CETE de l'Est, LRA-ENSA Toulouse LMDC, MPF, *Étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes : HYGROBA* (2013)

Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C. and Bertron, A. 'Plant Aggregates and Fibers in Earth Construction Materials : A Review', *Construction and Building Materials*, 111 (2016)

Plé, Olivier, 'Comportement multifonctionnel de PArois Complexes géo et bio-Sourcées', *Agence nationale de la recherche*

Rakotomalala, Lalaina, *Terre-Typha. Construire en terre et en roseaux au Sénégal* (Grenoble : CRAterre-ENSAG, 2015)

Documents grand public

ADEME, 'Impact environnemental du bâtiment', *Agence de la transition écologique*

ADEME, 'Les produits biosourcés en 10 questions'

Atelier ALP, 'Isoler Un Mur En Pisé'

AIA life designers, and Ekopolis, 'Mieux concevoir et construire en terre crue : collection « Construire autrement »', 2023

APAVE, and Envirobot, 'Guide technique des matériaux biosourcés & géosourcés à l'usage des acteurs de la construction - Le regard du contrôleur technique'

AQC, 'Maîtriser la migration de vapeur d'eau dans les parois', 2023

Cerema Ouest, 'Le coût des matériaux biosourcés dans la construction : Etat de la connaissance (2016)' (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie)

ENERTECH SCOP, 'Migration d'humidité et de vapeur dans les parois du bâti ancien', 2017

Faire, Energence, and Tinergie, 'Bâti Ancien et Humidité' (ADEME)

Héberlé, Elodie, 'Synthèse Bibliographique Des Études Sur La Rénovation Thermique Du Bâti Ancien à l'aide de Matériaux Isolants Biosourcés', 2016

INFO ENERGIE 69, 'Rénovation et extension d'une maison en pierres et pisé', *La cartographie des grands projets*, 2023

La maison écologique, 'Tableau Comparatif Des Isolants' (La maison écologique, 2015)

Ministère de la transition écologique, 'Les Matériaux de Construction Biosourcés et Géosourcés'

Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, and Ministère de la transition énergétique, 'Réglementation environnementale RE2020'

Sites internet

'Alnatura Campus | Loam Clay Earth, Martin Rauch, Vorarlberg'
<https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=97>

'CHÈZENEUVE - TERA-TERRE' <https://www.tera-terre.org/chezeneuve/>

'Rechercher un produit évalué', CSTB Évaluation
<http://evaluation.cstb.fr/fr/rechercher/>

'Projet La Recette - Madelaine architectes'
<https://mdl.org/chavornay>

'PNTERRRE objectifs', <https://projet-national-terre.univ-gustave-eiffel.fr/presentation/objectifs>

'Dom&Bio' <http://www.domebio.fr/particuliers-renovation/canonical-url/>

'Liège' <https://www.naturel21.com/liege.html>

'Panneaux copano', COPANO
<https://www.copano.fr>

'Isohemp, Rénovation - Isolation par l'extérieur',
<https://www.iso hemp.com/fr/reference/renovation-isolation-par-l-exterieur-veeneendaal-nl>

Fiches techniques

LE RELAIS, 'Catalogue Métisse'

ENERPAT, 'Fiche Technique Panneaux de Roseaux'

Isol en paille, 'Fiche Technique LA BOTTE DE 36'

Vidéo

'CobBauge - Film Long on Vimeo'
<https://vimeo.com/789960429/d9d2fc945e?fbclid=IwAR0P0u0nKtp2YvMb30Ex-Aep9cbgGfpTntsdrX1s1ETo6Zsbu00h-RSvpFMhhttps://actu.fr/normandie/saint-andre-de-bohon_50445/et-si-la-terre-re-devenait-le-meilleur-materiau-pour-construire-des-maisons_47181667.html>

'LeOFFduDD2021 - Foyer d'apprentis à Siorac-de-Ribérac (24) - YouTube'
<<https://www.youtube.com/watch?v=WdRJSkOJRJo>>

'La Recette, dir. by Antoine Beguin, 2023'
<<https://vimeo.com/816955239>>
[accessed 19 October 2023]

'Projection Chaux Chanvre - YouTube'
<<https://www.youtube.com/watch?v=EbNFY8foK80>>

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Le foyer, crédits photos : Dauphin architecture.....	8
Figure 2 : Consommation énergétique nationale par secteur d'activité en France en 2015, source : Ministère de l'Environnement de l'Energie	10
Figure 3 : Utilisation de l'inertie du pisé, Maison Piazza Pintgia, Almens, Suisse 2013, Maitre d'oeuvre : gujan + pally architekten, Réalisation : Martin Rauch.....	11
Figure 4 Courbe de température au cours de la journée, source : l'isolation du pisé : pertinence et principes	12
Figure 5 Source d'humidité dans le bâtiment, schémas issus du PDF « bati ancien et humidité »	12
Figure 6 Isothermes de sorption à 23°C d'échantillons de pisé prélevé sur des murs existants, source : Thèse de M. Florian Champiré.....	13
Figure 7: Schematic representation of heat and moisture transfers within an earth wall , Thèse Lucile Soudani.....	13
Figure 8 Le pisé un matériau poreux, Source : site internet Amàco, L'esthétique de strates du pisé est sublimé par des jeux de couleurs. Auteur de l'œuvre : Atelier Alba.	14
Figure 9 lien entre résistance et teneur en eau, source : Béton d'argile environnemental, Une publication amàco et CRAterre-AE&CC-ENSAG	15
Figure 10 : couplage de transfert, source : l'isolation du pisé pertinence et principes	15
Figure 11 : Règles liées à la perméabilité des matériaux pour éviter la condensation, source : Maitriser la migration de vapeur d'eau dans les parois, AQC	16
Figure 12 Source : « Maîtriser la migration de vapeur d'eau dans les parois » – AQC.....	16
Figure 13 : Coupe axonométrique sur un bâti en pisé traditionnel, dessins : Arnaud Misse, source : réhabiliter le pisé	18
Figure 14 Coupe axonométrique sur un bâti en pisé contemporain, dessins : Arnaud Misse, source : réhabiliter le pisé, auteurs ; Sébastien Moriset, Joffroy Thierry, Hubert Guillaud, Martin Pointet,, Misse Arnaud, CRAterre	18
Figure 15 : ITI d'un mur en pisé, Source : Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, Auteur : Enertech	20
Figure 16 : Isolation par l'extérieur d'un mur en pisé, source : migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, Auteur : Enertech	21
Figure 17 : étude HYGROBA.....	22
Figure 18 : Analyse de cycle de vie des produits biosourcés - Illustration ADEME, document « les produits biosourcés en 10 questions »	24
Figure 19 : Les matériaux biosourcés, source : Obat	25
Figure 20 : Réalisation de terre allégée aux grands ateliers dans le cadre des formations Amàco	28
Figure 21 : Chaux-chanvre en isolation extérieur,	29
Figure 22 : Rénovation Brullioles, Source : espace info énergie, crédits photos : Domébio	34
Figure 23 : Rénovation Brullioles, Source : espace info énergie, crédits photos : Domébio	35
Figure 24: : ITE en botte de paille, crédits photos : Julien Cerri	36
Figure 25 : ITE en botte de paille, crédits photos : Julien Cerri	37
Figure 26 : Isolation ouate de cellulose projetée, source et crédits photos : Caracol	38
Figure 27 : Isolation ouate de cellulose projetée, source et crédits photos : Caracol	39
Figure 28 ; Maison ITE roseaux, source et crédits photos : Martin Pointet.....	40
Figure 29 Panneaux de roseaux, dessins : Mathilde Beguin, source : réhabiliter le pisé	41
Figure 30 ; Maison ITE roseaux, source et crédits photos : Martin Pointet.....	41
Figure 31 : Le foyer Ribérac, source : Dauphins architecture site internet	43
Figure 32 : « Le foyer » Ribérac, source : Dauphins architecture site internet	44
Figure 33 Projet Alnatura , source : https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=97	46
Figure 34 : Vue de dessus sur la banche, source : https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=97	46
Figure 35: images phases conception du projet, sources : Ecozimut	47

Figure 36 : réalisation des mégas BTC pour le projet carré flore, sources : Ecozimut	47
Figure 37 : Projet pilote Cob bauge, source : site internet Cob bauge	48
Figure 38 : Projet pilote Cob bauge, source : site internet Cob bauge	49
Figure 39: Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen, source : Nunc architecte.....	51
Figure 40 Mur trombe du centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen, source : Nunc architecte	51
Figure 41 Coupe sur double mur façade EST, source : Nunc architectes.....	51
Figure 42 : coupe sur mur et vue de dessus projet Collège de Béthoncourt, source : BE Terre, Martin Pointet.....	53
Figure 43; Collège innovant de Béthoncourt, source : CRR architecture	53
Figure 44: Dessins : Mathilde Beguin, Ouvrage : réhabiliter le pisé, isolation thermique extérieur avec isolation rapportée, auteur : CRAterre, Sébastien Moriset , Thierry Joffroy , Guillaud Hubert , Pointet Martin , Arnaud Misse	54
Figure 45 Image correspondante au chantier de rénovation d'une maison dans l'Aveyron avec Copano (même technique d'isolation que pour le projet la gaité), source : site internet Copano	55
Figure 46: Projet "la recette", source : site internet madeleine architectes, crédits photos : séverin Malraux et madeleine architecte.....	57
Figure 47: Rénovation d'une maison à Veeneendaal (NL), source : site internet ISOHEMP	58
Figure 48 : Noé Solsona	59
Figure 49 : Luc Van Nieuwenhuyze,	59
Figure 50 : Julien Cerri,	59
Figure 51 Premières propositions de complexes à étudier et de mises en œuvre pour la suite des recherches	71
Figure 52 Coefficient de conductivité thermique du pisé, source : construire en terre crue.....	79
Figure 53 Valeur du coefficient d'absorption liquide	79

ANNEXES

ANNEXE 1

Résistance thermique, coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau et valeur Sd

Sources :

- Ouvrage « Construire en terre crue », auteurs Ziegert Christof et Röhlen Ulrich
- cours thermique développé par Amàco

-La résistance thermique d'un matériau

La formule suivante permet de calculer l'ordre de grandeur de la résistance thermique d'un matériau ; $R (m^2.K/W) = \text{épaisseur de la couche (mètre)} / \lambda \text{ conductivité thermique (W/mK)}$.

-Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau « μ » indique dans quelle mesure, la vapeur d'eau traverse plus difficilement ce matériau que l'air. La valeur μ d'un matériau est toujours supérieure à 1 et n'a pas de grandeur. **Plus μ est élevé plus il s'oppose à la vapeur d'eau.**

Lorsque le μ d'un matériau vaut 5, cela signifie que la vapeur d'eau traverse 5 fois plus difficilement ce matériau que l'air.

-L'épaisseur équivalente de diffusion Sd correspond à l'épaisseur en mètre de la couche d'air stationnaire qui exercerait la même résistance à la diffusion de vapeur que la couche de matériau.

Sd = $\mu \times e$ et s'exprime en mètre. **Plus Sd est élevé plus le matériau s'oppose à la vapeur d'eau.**

Masse volumique (kg/m ³)	Coefficient de conductivité thermique (W/m.K)
1700	0,82
1800	0,91
1900	1,00
2000	1,10
2100	1,20
2200	1,40
2300	1,50

Figure 52 Coefficient de conductivité thermique du matériau. source : construire en terre crue

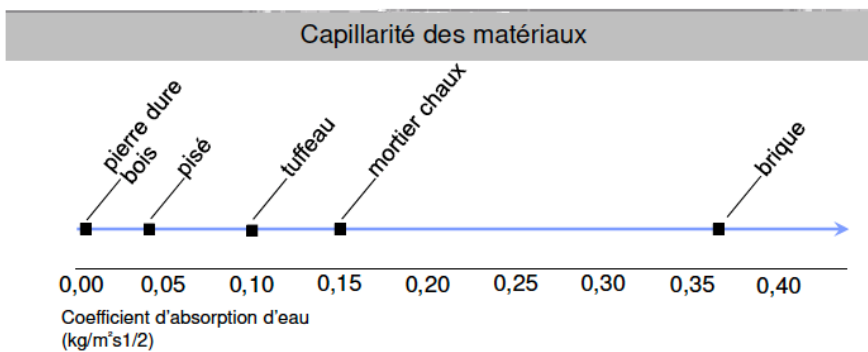


Figure 53 Valeur du coefficient d'absorption liquide

ANNEXE 2

Caractéristiques thermiques et hygroscopiques du matériau pisé

Source : « synthèse bibliographique des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés », auteur : Cerema – octobre 2016

	Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique massique Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique volumique pCp (kJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Diffusivité D (*10 ⁻⁶ .m ² .s ⁻¹)	Déphasage ϕ (h) pour 20 cm de paroi	Efficacité E (J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2})	Hygroscopicité – teneur en eau de référence w80 (kg.m ⁻³)	Hygroscopicité – teneur en eau finale pour une humidité relative de 100 % w _f (kg.m ⁻³)	Résistance à la diffusion de vapeur μ (-)	Epaisseur de lame d'air équivalente Sd (m) pour 20 cm de paroi	Capillarité – coefficient d'absorption liquide A (kg.m ⁻² .s ^{1/2})
Tuffeau	1450	0,34	925	1341	0,25	9,2	673	76	259	10	2	0,1
Grès	2150	2,3	850	1828	1,26	4,1	2050	3,4	110	32	6,4	0,05
Pierre calcaire dure	2440	2,25	850	2074	1,08	4,4	2160	2,5	75	140	28	/
Pisé	1620	0,59	830	1345	0,44	6,9	891	28	390	10,3	2,1	0,62
Torchis	1514	0,59	1000	1514	0,39	7,4	945	19	294	11	2,2	0,05
Brique ancienne	1800	0,6	850	1530	0,39	7,4	958	4,5	230	15	3	0,36
Mortier à la chaux hydraulique	1785	0,7	850	1517	0,46	6,8	1031	6,5	248	15	3	0,15
Béton	2300	1,6	850	1955	0,82	5,1	1769	85	150	180	36	0,003
Brique monomur	1650	0,6	850	1403	0,43	7	917	9,2	370	10	2	0,4
Enduit ciment	2000	1,2	850	1700	0,71	5,5	1428	35	280	25	5	0,01

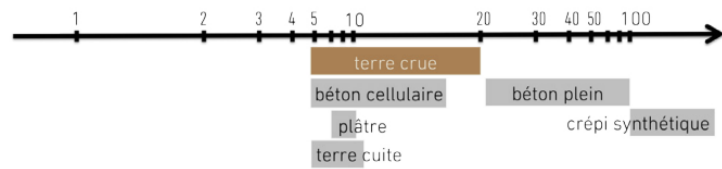
Tableau 8 : Caractéristiques physiques et hygrothermiques de matériaux de construction en général (source : [logiciel WUFI, 1995] et [cahiers HYGROBA, 2013])

ANNEXE 3

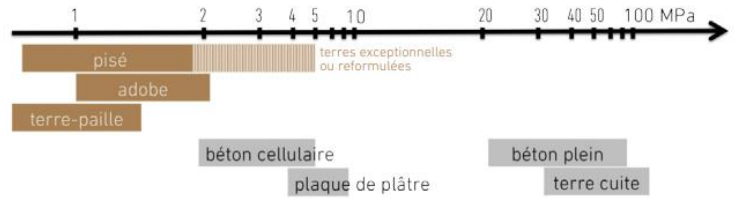
Propriétés physiques du pisé

Source : Béton d'argile environnemental, Auteurs : Moevus Mariette, Fontaine Laetitia, Anger Romain, Doat Patrice, Couvreur Lucile, Cloquet Basile

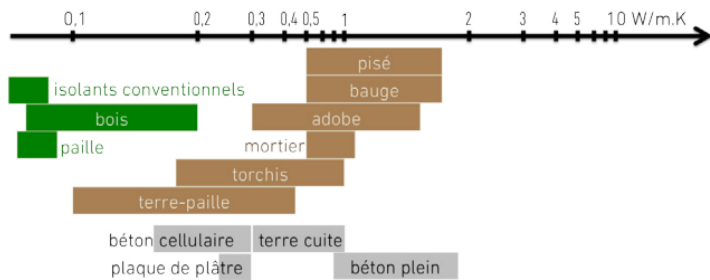
Le coefficient de résistance à la vapeur d'eau (μ)



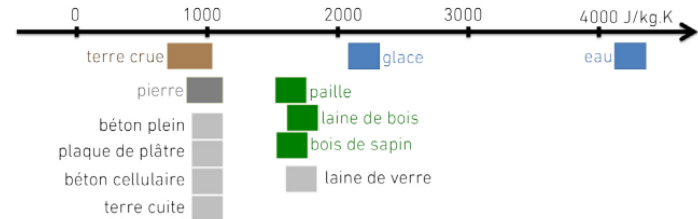
La résistance à la compression



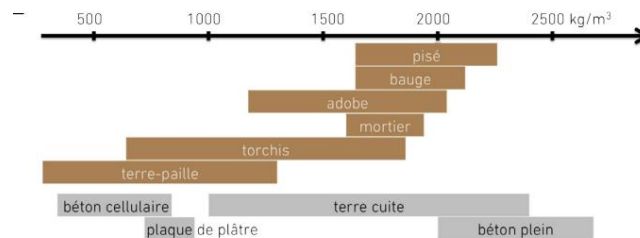
La conductivité thermique (λ)



La capacité thermique (c)



La masse volumique sèche (ρ)



ANNEXE 4

Condensation et migration de vapeur d'eau dans les parois

Source : « Maitriser la migration de vapeur d'eau dans les parois », auteur : AQC

DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE

L'air humide et la condensation

L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau en proportions variables. La quantité de vapeur d'eau que l'air peut absorber est fonction de sa température.

Plus l'air sera chaud, plus il pourra contenir une quantité de vapeur d'eau importante avant saturation et condensation ; par exemple :

- à 5 °C, un air sec peut absorber 5,4 g d'eau par kg d'air sec ;
- à 20 °C, un air sec peut absorber 14,7 g d'eau par kg d'air sec.

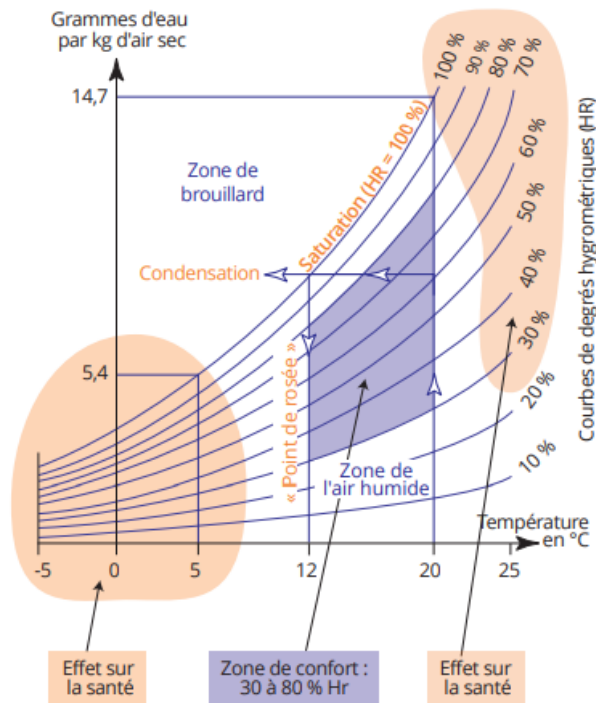
Le poids de la vapeur d'eau dans l'air sec, exprimé en g/kg air sec, est appelé l'humidité spécifique. Le ratio entre la quantité de vapeur dans l'air et la quantité maximale qu'il peut contenir est défini comme l'humidité relative en %. L'air est saturé à une humidité relative de 100 %.

Lorsque l'air est à saturation (quantité maximale de vapeur absorbée), tout excédent de vapeur d'eau dans l'air va condenser. La température à laquelle apparaît cette condensation est appelée « point de rosée ».

Le diagramme de l'air humide, appelé diagramme de Mollier, (voir figure ci-contre) permet de décrire les caractéristiques physiques de l'air humide en fonction de la température et fournit le point de rosée pour chaque couple température - taux d'humidité relative.

Il montre les zones de confort et les zones ayant un impact sur la santé en fonction du pourcentage d'humidité relative de l'air et de la température intérieure.

Un excès d'humidité peut conduire à des désordres sur le bâti.

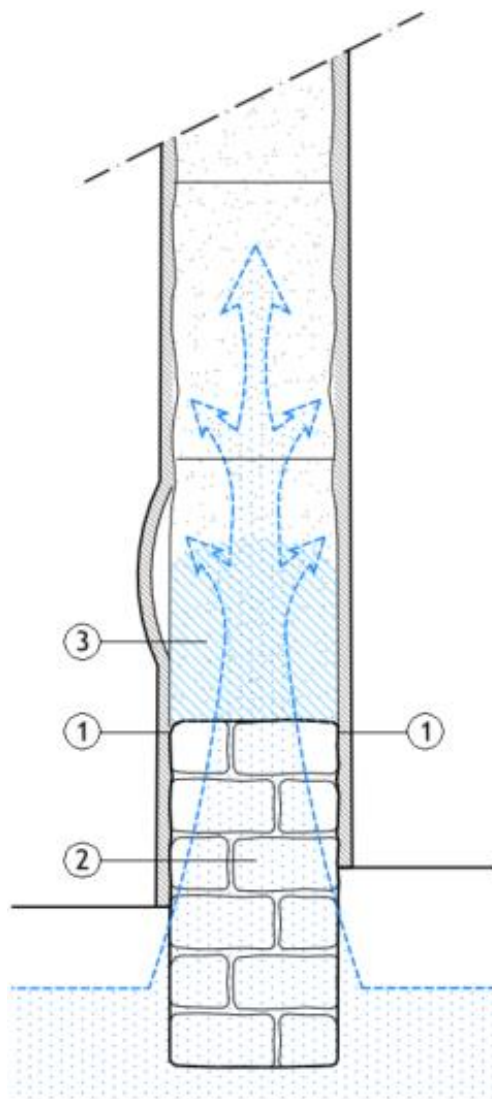


Exemple de diagramme de Mollier

ANNEXE 6

Dégradation dans un mur en cas de revêtement imperméable et non capillaire

Source : Ouvrage « réhabiliter le pisé », auteurs : Mathilde Beguin, Patrice Doat, Hubert Guillaud, Arnaud Misse, Sébastien Moriset, Martin Pointer



a. Existant.

1. Revêtements étanches.
2. Remontées capillaires en bas de mur.
3. Concentration d'eau dans le pisé.

ANNEXE 7

Classement des isolants capillaires, perméables et putrescibles

Source : Cours Samuel Courgey ASDER

Caractéristiques "hygro" des isolants

NON PERMEABLE à LA VAPEUR D'EAU

- Verre cellulaire
- Polystyrène extrudé

PEU (à très peu) PERMEABLE à LA VAPEUR D'EAU

- Panneau de liège
- Laine de chanvre
- Panneau de fibres de bois

PERMEABLE à LA VAPEUR D'EAU

- Ouate de cellulose
- Laine minérale
- Botte de paille

Caractéristiques "hygro" des isolants

NON HYGROSCOPIQUE NON CAPILLAIRE

- Laine minérale
- Verre cellulaire
- Panneau polyuréthane
- Polystyrène extrudé
- Panneau de liège
- Polystyrène expansé
- Mousse minérale

HYGROSCOPIQUE & CAPILLAIRE

- Ouate de cellulose
- Laine de chanvre
- Botte de paille
- Panneau de fibres de bois

Caractéristiques "hygro" des isolants

NON PUTRESCIBLE & NON ALTERABLE

- Verre cellulaire
- Mousse minérale

NON PUTRESCIBLE, MAIS ALTERABLE

- Polystyrène extrudé
- Panneaux polyuréthane
- Panneau de liège

PUTRESCIBLE & ALTERABLE

- Ouate de cellulose
- Laine de chanvre
- Panneau de fibres de bois
- Botte de paille

ANNEXE 8

Caractéristiques thermiques et hygrothermiques des différents isolants bio et/ou géo source

Source : « Synthèse bibliographiques des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés », auteur : Cerema - octobre 2016

	Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique massique Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique volumique ρC_p (KJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Diffusivité D (*10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹)	Déphasage ϕ (h) pour 20 cm de paroi	Efficacité E (J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2})	Hygroscopicité – teneur en eau de référence w80 (kg.m ⁻³)	Hygroscopicité – teneur en eau finale pour une humidité relative de 100 % wf (kg.m ⁻³)	Résistance à la diffusion de vapeur μ (-)	Epaisseur de lame d'air équivalente Sd (m) pour 20 cm de paroi	Capillarité – coefficient d'absorption liquide A (kg.m ⁻² .s ^{-1/2})
Panneau de laine de roche	100	0,04	1030	103	0,34	7,9	60	0,02	0,5	1	0,2	/
Panneau de laine de verre	50	0,04	1030	52	0,68	5,6	42	0,7	329	1	0,2	/
Panneau de verre cellulaire	110	0,04	1000	110	0,36	7,7	66	2	12	∞	∞	/
Panneau de polystyrène expansé	25	0,04	1450	36	0,97	4,7	36	2	45	40	8	/
Panneau de polystyrène extrudé	38	0,03	1450	55	0,58	6,0	42	2	45	80	16	/
Panneau de polyuréthane	30	0,02	1400	42	0,55	6,2	31	1,12	28	30	6	/
Panneau de silicate de calcium	270	0,07	1000	270	0,26	9,0	137	20	793	1	0,2	1,12
Panneau de mousse de pierre	115	0,04	850	98	0,41	7,2	63	8,1	197	4,1	0,82	0,01
Cellulose en vrac	40	0,04	2150	86	0,48	6,6	59	7,9	614	1	0,2	0,2
Matelas souple de cellulose	50	0,04	2150	108	0,37	7,6	66	7,9	614	1	0,2	0,2
Matelas souple de fibre de bois	75	0,04	2100	158	0,24	9,4	77	7	180	3	0,6	0,04
Panneau rigide de fibre de bois	160	0,04	2100	336	0,12	13,3	116	17,3	526	3	0,6	0,003
Panneau de liège	120	0,04	1600	192	0,21	10,0	88	2	45	5	1	/
Panneau semi-rigide de fibres de chanvre	30	0,04	1600	48	0,83	5,0	44	5	348	1	0,2	0,02
Mélange chaux-chanvre	440	0,11	1560	686	0,16	11,5	275	30	546	3	0,6	0,07

ANNEXE 9

Les isolants dérivés du bois

Sources : « Synthèse bibliographiques des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés » édité par le Cerema, L'étude de « La maison écologique », guides « Les matériaux biosourcés dans le bâtiment » édité par Bâtir pour la planète et « Le coût des matériaux biosourcés dans la construction » édité par le Cerema

Les produits	Laine de bois	Panneaux de fibre de bois	Fibre de bois en vrac
Produit industrialisé	Oui	Oui	Oui
Capacité hygroscopique / capillaire	Oui moyenne à faible	Oui moyenne à Faible	
Résistance à la vapeur d'eau (mu)	1 à 2 – perméable	3 à 8 – perméable	1 à 2 - perméable
Classement au feu	E	E	E
Temps de déphasage en heure pour 20 cm	7.5 – 8	15	7.5
Bilan environnemental : -Energie primaire (kWh Ep/UF) -Effet de serre (Kco2 Eq/UF)	51.5 -5.5	173.3 -18.6	51.5 -5.5
Prix pour épaisseur correspondante à R= 5	24 à 38 euros /m2 (la maison écologique)	36 à 45 euros/m2 (la maison écologique) 19 euros/m2 (l'observatoire cerema)	24 à 38 euros /m2 (la maison écologique)
Conductivité/ Epaisseur à mettre en œuvre pour obtenir un R de 5	Conductivité (W/m. K) : 0,037-0,046 Entre 19 et 23 cm		

Analyse du tableau de caractéristique physique des matériaux à base de bois

+	-
<p>-Produits industrialisé, se trouvent facilement dans le commerce</p> <p>-Hygroscopique et capillaire moyenne</p> <p>-Perméable à la vapeur d'eau : participe à la régulation hygrométrique du bâtiment</p> <p>-Matériau participant au confort d'été : pour obtenir une résistance thermique de 5, nécessité de mettre en œuvre environ 20 cm, ce qui permet d'atteindre un déphasage allant de 7.5h pour la laine de bois à 15h pour le panneau de fibre de bois</p> <p>-En se basant sur l'observatoire du cerema prix de 19 euros/m2 pour le panneau de fibre de bois : coût relativement correct pour un isolant biosourcé</p> <p>-Bonnes performances acoustique</p> <p>-Très bonne résistance dans le temps</p> <p>-A déjà été mis en œuvre sous forme ITE (de nombreux retours d'expérience existent)</p> <p>-Possibilité d'appliquer un enduit à la chaux directement sur fibre de bois rigide</p>	<p>-Produit inflammable</p> <p>-Produit avec impact environnemental plus élevé que les autres matériaux biosourcés pour la fibre de bois (lié au liant ajouté pour agglomérer les fibres), la laine de bois a un impact environnemental moyen</p> <p>-Peut nécessiter un traitement chimique contre les moisissures ou les attaques d'insectes</p> <p>-Les murs doivent être parfaitement plans avec la fibre de bois rigide</p>

ANNEXE 10

Les isolants dérivés du liège

Sources : « Synthèse bibliographiques des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés » édité par le Cerema, L'étude de « La maison écologique », guides « Les matériaux biosourcés dans le bâtiment » édité par Bâtir pour la planète et « Le coût des matériaux biosourcés dans la construction » édité par le Cerema

Les produits	Panneaux et rouleaux de liège	Liège en vrac
Produit industrialisé	Oui	Oui
Capacité hygroscopique / capillaire	Non	Non
Résistance à la vapeur d'eau (μ)	5 à 30 – peu perméable	5 à 30 – peu perméable
Classement au feu	E Le liège est difficilement inflammable : il peut résister à des températures allant jusqu'à 120°C sans prendre feu. Il est un des matériaux bio sources les plus résistant au feu (mais pas autant que la laine de roche ou laine de verre)	E
Temps de déphasage en heure pour 20 cm	13	9
Bilan environnemental : -Energie primaire (kWh Ep/UF) -Effet de serre (Kco2 Eq/UF)	41.4 -25.6	41.4 -25.6
Prix du matériau pour épaisseur correspondante à R= 5	45 à 71 euros/m2 (la maison écologique) 82 euros/m2 (l'observatoire du cerema)	28 à 42 euros/m2 (la maison écologique)
Conductivité/ Epaisseur à mettre en œuvre pour obtenir un R de 5	Conductivité 0.036 à 0.042 W/m. K, Entre 18 et 21 cm	Conductivité de 0.04 à 0.045 W/m. K Entre 20 et 22 cm

Analyse du tableau des caractéristiques physique des matériaux à base de liège

+	-
<ul style="list-style-type: none"> -Produits industrialisés, se trouvent facilement dans le commerce -Matériau participant au confort d'été : pour obtenir une résistance thermique de 5, nécessite de mettre en œuvre environ 20 cm, ce qui permet d'atteindre un déphasage allant de 9h pour le vrac à 13h pour le panneau -Impact environnemental moyen -Bonne performances acoustiques -Biodégradable -Matériau imputrescible -Ne comporte aucun additif (même pour l'agglomération des panneaux) -Bonne résistance à l'humidité, aux tassements, aux rongeurs et insectes, au feu et à la pourriture -Bien que son classement soit E, il fait partie des isolants biosourcés les plus difficilement inflammables 	<ul style="list-style-type: none"> -Non hygroscopique et non capillaire -Peu perméable à la vapeur d'eau (plus adéquat à l'intérieur qu'à l'extérieur car la couche extérieure doit être très ouverte à la vapeur d'eau) -En se basant sur l'observatoire du cerema prix de 82 euros/m2 pour le panneau : cout très élevé -Le liège est généralement importé -Nécessite une finition type bardage (+ couteux)

ANNEXE 11

Les isolants dérivés de la paille

Sources : « Synthèse bibliographiques des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés » édité par le Cerema, L'étude de « La maison écologique », guides « Les matériaux biosourcés dans le bâtiment » édité par Bâtir pour la planète et « Le coût des matériaux biosourcés dans la construction » édité par le Cerema

Les produits	Botte de paille	Paille en vrac
Produit industrialisé	Non, chez producteur/ agriculteur	Non, directement chez agriculteurs
Capacité hygroscopique / capillaire	Forte	Forte
Résistance à la vapeur d'eau (mu)	1	1
Classement au feu	E	E
Temps de déphasage pour une botte	14h de déphasage	
Bilan environnemental : -Energie primaire (kWh Ep/UF) -Effet de serre (Kco2 Eq/UF)	NC -14	NC -14
Prix du matériau	1 ou 2 € la botte, soit entre 2 à 4 euros/m ² (R supérieur à 7)	1 ou 2 € en bottes
Conductivité/ Epaisseur à mettre en œuvre pour obtenir un R de 5	Conductivité (W/m. K) : 0,050-0,075 Avec une botte de 36 cm d'épais R supérieur à 7	Conductivité (W/m. K) : 0,050-0,075 Pour atteindre un R de 5 : 25 cm d'isolant

Analyse du tableau des caractéristiques physique des matériaux à base de paille

+	-
<p>-Non industrialisé mais on en trouve partout chez les agriculteurs à condition de vérifier que les bottes sont bien conformes aux propriétés demandées par la RFCP pour construire en paille (densité et niveau d'humidité).</p> <p>-Matériau très capillaire et hygroscopique (doit absolument être bien protégé de la pluie ; enduit extérieur continue en tout point ou bardage).</p> <p>-Très perméable à la vapeur d'eau : participe à la régulation de l'humidité intérieure</p> <p>-Très bon déphasage : 14h pour une botte ; participe au confort d'été</p> <p>-Impact environnemental très faible : ne nécessite aucune transformation ou traitement chimique</p> <p>-Prix du matériau très faible (1 à 2 euros la botte) en comparaison aux autres matériaux bio sourcé</p> <p>-Avec l'épaisseur d'une botte de paille on obtient une excellente résistance thermique (supérieure à 7)</p> <p>-L'isolation en botte de paille sera à l'avenir facilement assurable car couvert par des règles pro</p> <p>-Facilité de mise en œuvre notamment en auto construction et formations proposées « pro paille » par la RFCP</p> <p>-Bonne performance acoustique</p> <p>-Ressource disponible en quantité et uniformément sur le territoire français, ressource renouvelable</p> <p>-Ne nécessite aucun traitement chimique Permet l'application d'une finition type enduit chaux</p>	<p>-La paille est inflammable</p> <p>-Etant donné qu'il est non industrialisé donc pas de suivis qualité, il est nécessaire pour le poseur de faire ses propres vérifications (densité et humidité cf. Règles pro pailles)</p> <p>-La construction en botte de paille induit la mise en œuvre d'une épaisseur d'isolant conséquente d'une largeur de botte, dépassement de toiture conséquent à observer</p> <p>-Poids des bottes conséquentes en comparaisons aux autres isolants biosourcé (nécessite une structure porteuse)</p> <p>-Forte sensibilité à l'humidité et aux rongeurs, la paille doit être protégée</p> <p>-La planéité des murs doit être reprise si construction en botte (tous les vides d'air doivent être comblés)</p>

ANNEXE 12

Les isolants dérivés du chanvre

Sources : « Synthèse bibliographiques des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés » édité par le Cerema, L'étude de « La maison écologique », guides « Les matériaux biosourcés dans le bâtiment » édité par Bâtir pour la planète et « Le coût des matériaux biosourcés dans la construction » édité par le Cerema

Les produits	Laine de chanvre (rouleaux ou panneaux)	Chênevotte en vrac
Produit industrialisé	Distribuée soit par les chanvrières, soit par des négociants en matériaux.	Idem que laine de chanvre
Capacité hygroscopique / capillaire	Moyenne	Moyenne
Résistance à la vapeur d'eau (mu)	1 à 2	1 à 2
Classement au feu	E	E
Temps de déphasage en heure pour 20 cm	5 à 7	8.5
Bilan environnemental : -Energie primaire (kWh Ep/UF) -Effet de serre (Kco2 Eq/UF)	60.8 5.1	15.5 -48.9
Prix du matériau pour épaisseur correspondante à R= 5	20 à 40 euros / m2 (la maison écologique) 20.80 euros (observatoire cerema)	17 à 30 euros /m2 (la maison écologique)
Conductivité/ Epaisseur à mettre en œuvre pour obtenir un R de 5	Conductivité (W/m. K) :0.038 à 0.042 Pour R = 5 → entre 19 et 21 cm Pour R= 3.7 → 16 cm	Conductivité (W/m. K) :0.048 W/ Pour R=5 → 24 cm Pour R=3.7 → 18 cm

Analyse du tableau de caractéristique physique de matériaux à base de chanvre

+	-
<p>-Chênevotte distribuée soit directement par les chanvrières, soit par des négociants en matériaux, les panneaux sont industrialisés</p> <p>-Matériau capillaire et hygroscopique (moins que la paille mais plus que le bois)</p> <p>-Très perméable à la vapeur d'eau : participe à la régulation de l'humidité intérieure</p> <p>-Matériau participant au confort d'été : pour obtenir une résistance thermique de 5, nécessite de mettre en œuvre environ 20 cm, ce qui permet d'atteindre un déphasage allant de 7 à 8.5 heures</p> <p>-Impact environnemental moyen pour la laine de chanvre à faible pour le vrac</p> <p>-En se basant sur l'observatoire du cerema prix de 19 euros/m2 pour la laine de chanvre : cout relativement correct pour un isolant biosourcé, quant au chanvre en vrac le cout du matériau est inférieur à celui de la laine de chanvre</p> <p>-Bonne performance acoustique</p> <p>-Culture locale qui nécessite peu d'engrais et peu d'eau</p> <p>-La laine de chanvre est très résistante aux insectes</p> <p>-Le chanvre est imputrescible antifongique antibactérien et ne craint pas les insectes ni les rongeurs.</p>	<p>-Produit inflammable</p> <p>-Peut contenir des retardateurs de feu (produits chimiques)</p> <p>-Nécessite une finition type bardage (+ couteux)</p>

ANNEXE 13

Les isolants dérivés de la Ouate de cellulose

Sources : « Synthèse bibliographiques des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés » édité par le Cerema, L'étude de « La maison écologique », guides « Les matériaux biosourcés dans le bâtiment » édité par Bâtir pour la planète et « Le coût des matériaux biosourcés dans la construction » édité par le Cerema

Les produits	Panneau en ouate de cellulose	Ouate de cellulose en vrac
Produits industrialisés	Oui	Oui
Capacité hygroscopique / capillaire	Moyenne Peu absorber jusque 15% de son poids	Moyenne Peu absorber jusque 15% de son poids
Isolation phonique	Particulièrement efficace entre 30 et 50 kg/m3	Particulièrement efficace entre 30 et 50 kg/m3
Résistance à la vapeur d'eau (mu)	2	1 à 2
Classement au feu	E	B à E
Temps de déphasage en heure pour 20 cm	12	7 à 10
Bilan environnemental Energie primaire (kWh Ep/UF) Effet de serre (Kco2 Eq/UF)	50.8 -3.5	17.1 -4.4
Prix du matériau pour épaisseur correspondante à R= 5	30 à 42 euros/m2 (la maison écologique)	10 à 15 euros /m2(la maison écologique) 10.26/m2 (observatoire du cerema)
Conductivité/ Epaisseur à mettre en œuvre pour obtenir un R de 5	Conductivité (W/m. K) : 0,038-0,043 Entre 18 et 22 cm	

Analyse du tableau des caractéristiques physiques des matériaux en ouate de cellulose

+	-
<ul style="list-style-type: none"> - Produits industrialisés - Produit qui peut être faiblement combustible B à E en fonction du traitement chimique reçu - Matériau capillaire et hygroscopique (peut absorber jusqu'à 15% de son poids en eau) - Très perméable à la vapeur d'eau : participe à la régulation de l'humidité intérieure - Matériau participant au confort d'été : pour obtenir une résistance thermique de 5, nécessite de mettre en œuvre environ 20 cm, ce qui permet d'atteindre un déphasage allant de 10/12 heures pour les panneaux à 7h pour le vrac - Impact environnemental moyen pour les panneaux à faible pour le vrac. Provient de produit recyclé : nécessite peu d'énergie lors de sa production - Prix faible comparable à des prix d'isolant standard type laine de verre pour la ouate de cellulose en vrac (10 euros/m2 + location machine soufflage), panneaux dans les mêmes ordres de prix que le bois - Bonne performance acoustique - Produit léger 	<ul style="list-style-type: none"> - Subit un traitement chimique pour la rendre résistante au feu, aux insectes et aux rongeurs - Dégagement de poussière à la pose, nécessite le port de masque lunette et gants - Peut dégager des odeurs et émettre des formaldéhydes dus aux résidus d'encre (en fonction de la qualité de la ouate) - Nécessite une finition type bardage (+ couteux)

ANNEXE 14

Les isolants dérivés du textile recyclé

Sources : « Synthèse bibliographiques des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés » édité par le Cerema, L'étude de « La maison écologique », guides « Les matériaux biosourcés dans le bâtiment » édité par Bâtir pour la planète et « Le coût des matériaux biosourcés dans la construction » édité par le Cerema

Les produits	Panneaux et rouleaux en coton recyclé	Textile recyclé en vrac
Produits manufacturés et certification Acermi	Oui produit manufacturé	
Capacité hygroscopique / capillaire	Moyenne Peut absorber jusqu'à 25% de son poids en eau	
Résistance à la vapeur d'eau (mu)	1 à 2	
Classement au feu	E	
Temps de déphasage en heure pour 20 cm	5 à 8 h pour 20 cm	
Bilan environnemental Energie primaire (kWh Ep/UF) Effet de serre (Kco2 Eq/UF)	L'énergie grise n'est pas bonne (aussi élevée que celle nécessaire pour la fabrication de la laine de verre). Ceci est dû à l'ajout de polyester qui assure la fonction de liant.	L'énergie grise n'est pas bonne (aussi élevée que celle nécessaire pour la fabrication de la laine de verre). Ceci est dû à l'ajout de polyester qui assure la fonction de liant.
Prix du matériau pour épaisseur correspondante à R= 5	21.17 euros (observatoire du cerema) 27 euros/m2 (https://conseils-thermiques.org/contenu/textiles-recycles.php)	21.17 euros (observatoire du cerema) 20 euros m/2 (https://conseils-thermiques.org/contenu/textiles-recycles.php)
Conductivité/ Epaisseur à mettre en œuvre pour obtenir un R de 5	0.039 à 0.047 20 cm pour R=5	

Analyse du tableau de caractéristiques physique de matériaux à base de textile recyclé

+	-
<ul style="list-style-type: none"> - Produits industrialisés - Produit inflammable classement E - Matériau capillaire et hygroscopique peut absorber jusqu'à 25% de son poids en eau - Très perméable à la vapeur d'eau : participe à la régulation de l'humidité intérieure - Matériau participant au confort d'été : pour obtenir une résistance thermique de 5, nécessite de mettre en œuvre environ 20 cm, ce qui permet d'atteindre un déphasage allant de 5 à 8 heures - La matière première est cependant abondante et issue du recyclage - Prix correct pour isolant biosourcé (autour de 20 euros/m2, reste plus chère que la ouate de cellulose) - Bonnes performances acoustiques - N'émet pas de composé organique volatil (COV) - Produit léger : deux fois plus léger que la ouate 	<ul style="list-style-type: none"> - Impact environnemental : l'énergie grise est aussi élevée que pour celle nécessaire pour la fabrication de la laine de verre. Ceci est dû à l'ajout de polyester qui assure la fonction de liant - Tassement possible en application verticale - Un traitement ignifuge s'impose avant la mise en œuvre. La faible résistance du textile recyclé face aux rongeurs oblige également à le traiter. - Soufflage deux fois plus long qu'avec la ouate de cellulose - Comme la majorité des isolants biosourcés, cet isolant est résilient en cas d'exposition à une humidité temporaire mais devient putrescible en cas d'humidité prolongée. - Nécessite une finition type bardage (+ couteux)

ANNEXE 15

Les panneaux de roseaux

Source : FT des panneaux de roseaux (https://enerpatsudoe.fr/wp-content/uploads/2019/02/25_pdfsam_fiche-vf-finalisce-1.pdf)

- Prix très élevé par rapport aux autres isolants naturels (de 35 € à 45 €/m²).
- Difficilement inflammables
- Energie grise élevée du fait de leur importation
- Pour 10 cm on obtient un R = 1.8

Propriétés physiques du matériau	
Conductivité thermique	0,055 a 0,060 W/m.°C
Densité	150 a 200 kg/m ³
Chaleur spécifique	0,6 J/kg.°C
Coefficient de diffusion a la vapeur d'eau	1 a 4
Perméabilité à la vapeur d'eau	45.10 ⁻⁵ a 90.10 ⁻⁵ g/m.h.mmHg
Bilan CO ₂	0 30 kg équivalent CO ₂ /m ³

ANNEXE 16

Les isolants bio-géo sourcés

Sources :

- Fiche technique produit Isohemp (briques préfabriquées de chaux-chanvre),
- Ouvrage « construire en terre allégée », auteur : Franz Volhard

	Chaux- chanvre (bloc isohemp)	Terre allégée
Hygroscopicité	Capillaire et hygroscopique	Capillaire et hygroscopique
Masse volumique sèche	340kg/m ³	300 kg/m ³
Lambda	0.071	0.1
R obtenu avec 30 cm	4.22 m ² . K/W	3 m ² .K/W
Épaisseur pour un R=5	36 cm	50 cm
Déphasage pour R=5	23.6 heures Épaisseur de 20 cm → R = 2.8 → déphasage 13h Épaisseur de 30 cm → R =4.2 → déphasage 19.7 h	Faible diffusivité thermique (vitesse de transmission de la chaleur, exprimant par conséquent le temps de déphasage thermique à travers la paroi : plus elle est faible, plus la chaleur met du temps à traverser l'épaisseur du matériau), de l'ordre de 2,53.10 ⁻³ m ² /h (5,92.10 ⁻³ m ² /h pour la brique cuite), la terre offre l'avantage d'un amortissement et d'un déphasage important
Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ	2.8	2 à 5
Résistance à la compression MPa	0.22	NC
Réaction au feu	B	B (difficilement inflammable)
Résistance au feu	2h	30 min à 90 min des essais doivent être confirmé en labo avec le mélange en question et la réalisation in situ
Isolation acoustique	Bon indice d'affaiblissement acoustique	Bon indice d'affaiblissement acoustique

ANNEXE 17

La terre allégée

Les caractéristiques physiques et hygrothermique de la terre allégée (Franz Volhard, Construire en terre allégée) :

	Masse volumique	Conductivité thermique	Capacité thermique massique ²⁾		Capacité thermique volumique ²⁾		Effusivité thermique	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau ³⁾
	kg/m ³	λ W/mK	c kJ/kgK		ρC kJ/m ³ K		b kJ/m ² h ^{0,5} K en moyenne	μ -
			TP	TCB	TP	TCB		
Matériaux terre								
Terre allégée								
	300 ¹⁾	0,1	1,3	-	400	-	12	2 à 5
	400 ¹⁾	0,12	1,2	-	500	-	14	
	600	0,17	1,1	1,5	700	900	20	
	800	0,25	1,1	1,4	900	1100	28	3 à 5
	1 000	0,35	1,1	1,3	1100	1300	37	
	1 200	0,47	1,0	1,2	1 200	1 500	45	
Terre lourde								
	1 400	0,59	1,0	1,1	1 400		54	5 à 10
	1 600	0,73		1,0	1 600		65	
	1 800	0,91		1,0	1 800		77	
	2 000	1,13		1,0	2 000		90	
En comparaison : ⁴⁾								
Béton lourd	2 400	2,1		1,0	2 400		135	70 à 150
Brique pleine	1 800	0,81		1,0	1 800		72	5 à 10
Brique alvéolée	800	0,33		1,0	800		31	5 à 10
Béton cellulaire	600	0,19		1,0	600		24	5 à 10
Bois résineux	600	0,13		2,1	1 260		24	40
Panneaux de laine de bois	400	0,09		2,1	840		17	2 à 5
Laine minérale	80	0,04		1,0	80		3	1

1) Une terre allégée de densité inférieure à 600 kg/m³ ne peut être obtenue qu'avec une terre grasse.
2) TP = terre-paille, TCB = terre-copeaux de bois. La chaleur spécifique de la terre allégée avec composants minéraux est d'environ c = 1,0 kJ/kgK, le coefficient de capacité thermique correspond ainsi à la densité.
3) Lors des calculs, prendre les valeurs les plus défavorables.
4) Valeurs de la norme DIN 4108.

Masse volumique et conductivité pour le pisé et la terre allégée (CRAterre, Réhabiliter le pisé) :

Tableau 2. Valeurs moyennes de conductivité pour plusieurs masses volumiques de terre.

	MASSE VOLUMIQUE SÈCHE (Kg/m ³)	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (W/m.K ⁰)
Terre allégée de fibres	500	0,1
	1 000	0,3
	1 500	0,6
Pisé	1 800	1
	2 000	1,2
	2 200	1,5

ANNEXE 18

Simulation thermique de paroi en statique, projet Alnatura

Source : Simulation UBAKUS

Intérieur: Circulation d'air réduite, 20 °C, 50 % Humidité de l'air, Rsi...

De l'int. vers l'ext.: inverser

	Épaisseur	Largeur	Distance	λ	μ	
1	Terre	200 mm		1,1	10	[Menu] [Pencil] [+]
2	Gravier de verre cellulaire	170 mm		0,12	2/3	[Menu] [Pencil] [+]
3	Terre	300 mm		1,1	10	[Menu] [Pencil] [+]
4						[Menu] [Pencil] [+]

Extérieur: Contact direct avec l'air extérieur, -5 °C, 80 % Humidité de l'air, Rse...

Extérieur

300

670

170

200

Intérieur

ubakus.de

Terre (300mm)

Gravier de verre cellulaire (170mm)

Terre (200mm)

Valeur U: 0,490 W/(m²K)

GEG 2020 Bestand U ≤ 0.24

Contribution à l'effet de serre:

bon mauvais

Condensation: 0,30 kg/m²

Humidité du bois: +0,0 %

Temps de séchage: 46 jours

bon mauvais

Valeur sd: 5,3 m

Surface intérieure: 17,1°C (60%)

Réserve de séchage: 294 g/m²a

mauvais

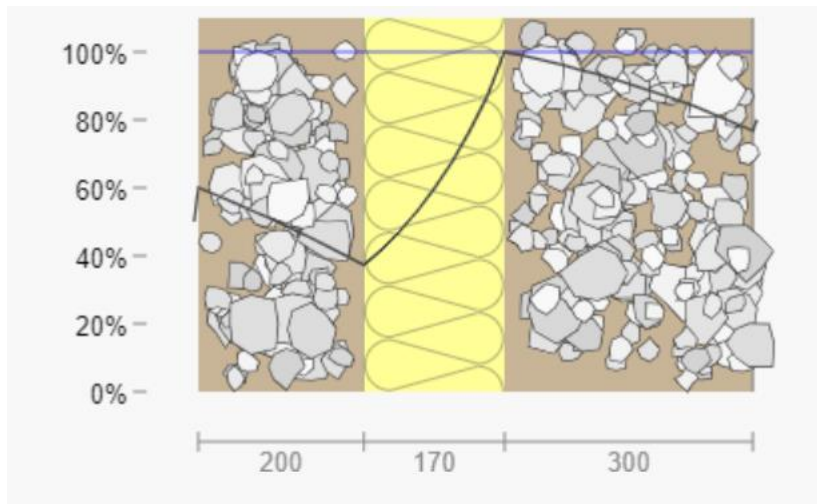
Épaisseur: 67 cm
Poids: 876 kg/m²

Atténuation des ampl. de Temp.: >100

Déphasage: 18 h

Capacité de chaleur int.: 344 kJ/m²K

bon mauvais bon



ANNEXE 19

Entretien téléphonique retranscrit avec Luc Van Nieuwenhuyze – spécialiste de l'isolation chaux

Source : entretien du 05.09.2023

Luc Van Nieuwenhuyze est formateur, expert en bâti ancien. Impliqué dans le réseau « construire en chanvre ». Il intervient chez Amàco au cours de la formation rénovation en bio&géo sourcé en tant qu'intervenant spécialiste du chaux-chanvre.

As-tu déjà réalisé une ITE en béton de chanvre sur des murs en terre crue ? Et quels sont les freins selon toi ?

Non je n'en ai jamais réalisé. Je pense qu'il y a jusqu'à présent une réticence des « terreux » à aller vers l'ITE de façon générale.

Et les Bureaux de contrôle n'aiment pas trop allier ITE et biosourcé.

Quelle est leur crainte ?

Pour les bureaux de contrôle, c'est comme tout, on n'a pas assez de retour d'expérience, ça leur fait peur. Leur principale crainte c'est que « ça pourrisse » et la force des lobbys n'aide pas.

Le béton de chanvre pour une ITE plutôt en projection ou banchage ?

Oui, on peut le faire en projection ou avec un banchage. On va plus souvent vers la projection car avec le banchage c'est plus long, il faut gérer des échafaudages et bouger les banches donc c'est moins rentable et plus complexe à réaliser. Mais la projection implique d'investir dans une machine.

Et concernant les ossatures secondaires ?

Dans les deux cas (banché ou projeté), une ossature secondaire est à réaliser (en bois). On peut mettre en œuvre des liteaux de 32 x 32 décollés / espacés de la paroi (avec des entretoises) pour que le béton de chanvre englobe le liteau entièrement.

Quelle épaisseur peut atteindre cette isolation ?

En termes d'épaisseur, on peut aller de 8 à 15cm, on pourrait même aller jusqu'à 20 ou 25 cm mécaniquement en adaptant l'ossature secondaire, mais après c'est une hérésie d'aller sur d'aussi grosses épaisseurs en se fixant uniquement sur la résistance thermique du matériau R. La résistance thermique du béton de chanvre ne représente pas complètement son fonctionnement, il y a d'autres phénomènes thermiques qui apportent du confort.

Et pour la finition, quelle épaisseur d'enduit ?

L'avantage du banchage c'est que l'épaisseur d'enduit de finition est amoindrie (moins d'irrégularités à rattraper), mais comme on est avec une ITE et que dans tous les cas on doit avoir une protection vis-à-vis de l'eau liquide (pluies et ruissellements) suffisamment conséquente, on va de toute façon aller vers des enduits épais de 2 ou 2.5 cm (mini). C'est donc plutôt un argument pour de l'ITI.

L'enduit chaux sur 2 ou 2.5 cm permet de conserver une forte perméance à la vapeur d'eau mais que l'eau liquide ne puisse pas passer.

Selon toi c'est une bonne solution que d'imaginer le béton de chanvre en ITE sur un mur en terre crue ?

J' imagine que cela peut être un bon cas d'étude pour la suite de ma thèse ?

L'ITE en béton de chanvre est une bonne chose en respectant les règles de forte perméance en extérieur et un fonctionnement très ouvert à l'intérieur. Cette solution permettrait d'accroître la résistance thermique du mur tout en gardant les bénéfices de la terre du côté intérieur.

Y'a pas mieux que de l'ITE perspirant sur la terre, après il y a une forte résistance intellectuelle pour aller vers cela.

Même si ce n'est pas contre un mur en terre crue, as-tu déjà réalisé une isolation avec le béton de chanvre côté extérieur ?

Oui, on a fait un bâtiment en béton de chanvre, mur monomasse, donc le béton de chanvre était en contact avec l'extérieur.

Vous avez des retours concernant les pathologies de ce bâtiment notamment ?

Pas sur ce bâtiment, mais dans le cadre de la révision des règles professionnelles, le retour d'expérience sur des pathologies a été fait (peut-être pas dans le cas de doublage isolant). Il y a eu des pathologies liées à la conception plutôt qu'au matériau en lui-même.

ANNEXE 20

Entretien téléphonique retranscrit avec Julien Cerri – Spécialiste de la construction en paille

Source : entretien du 12.09.2023

Julien Cerri est rédacteur des règles pro paille et charpentier constructeur en paille. Il intervient chez Amàco au cours de la formation rénovation en bio géo sourcé en tant qu'intervenant spécialiste concernant l'ITE en paille.

Où en sont les règles pro construction paille ITE ?

On travaille toujours dessus. La C2P a demandé un retour d'expérience, donc on recense les projets existants pour prouver que ça marche. D'ici un an et demi, elles devraient être éditées par la RFCP.

As-tu déjà réalisé une ITE paille sur un mur en pisé ?

Oui, j'ai isolé une maison de cette façon, avec ossature secondaire verticale en bois. Il y a possibilité ensuite de barder ou d'enduire, et à l'intérieur un enduit en terre fait l'affaire.

As-tu des recommandations, notamment pour traiter le pied de mur ?

Globalement, le problème des pieds de mur en ITE est le même avec l'ensemble des matériaux (avec le pisé, il faut qu'il soit capillaire).

Sur le projet que j'ai fait, les soubassements sont apparents, car j'ai un terrain en pente, donc j'ai tout posé sur pilotis. Ce qui permet d'avoir les pieds de mur en pierre à l'air libre pour l'évaporation capillaire.

Sinon, tu peux mettre en place des matériaux type béton cellulaire ou le bloc de mousse de verre, qui sont des matériaux assez ouverts, supports d'enduit et recyclables. Le béton cellulaire peut être porteur ou non en fonction des besoins, sachant que le porteur a un moins bon lambda et qu'il va nécessiter la mise en place d'une petite fondation. Le verre cellulaire est non porteur.

Surtout pas de liège en extérieur, ça va bien avec l'ITI, mais ce matériau est trop fermé à la vapeur d'eau pour être mis en œuvre en ITE (la valeur mue de perméabilité est trop élevée).

Y'a-t-il d'autres matériaux réalisés avec la paille qui permettraient une ITE ?

Il y a une société qui réalise des tatamis en paille pour isoler. On pourrait imaginer mettre deux couches croisées de tatamis sur les murs extérieurs en pisé. Cela a été réalisé sur le projet de la ZAC de Notre-Dame-des-Landes avec un enduit en extérieur et doublage par l'extérieur d'une maison existante (maison en poteaux-poutre bois).

Selon toi ce serait adaptable sur des murs en pisé ?

Oui, pourquoi pas.

Sais-tu s'il existe des techniques d'isolation réalisées avec de la paille insufflée dans des caissons ?

Le CROUS de Poitiers a été réalisé ainsi avec la société « Ielo ».

On parle de rénovation mais pour du pisé contemporain, donc des projets de pisé neuf, serait-ce envisageable selon toi d'isoler en paille ?

Oui sûrement. Je n'ai pas encore eu l'occasion de travailler là-dessus, mais sur du pisé neuf il faudrait attendre un séchage ou encore avec le pisé préfabriqué, noyer des cubes de bois dans le pisé afin de permettre les accroches avec l'ossature secondaire bois.

ANNEXE 21

Entretien téléphonique retranscrit avec Noé Solsona – Spécialiste de l'isolation en chaux-chanvre et en terre-chanvre par projection

Source : entretien du 20.09.2023

Noé Solsona est dirigeant de la société « Calyclay », qui est spécialisée en projection de terre-chanvre et chaux-chanvre. Il intervient chez Amàco au cours de la formation « rénovation en bio géo sourcé » en tant qu'intervenant spécialiste de la projection terre-chanvre.

As-tu déjà réalisé une ITE en terre chanvre/terre paille ou chaux chanvre sur des murs en terre crue ?

Oui, nous avons principalement travaillé avec le chaux-chanvre, car le terre-chanvre est plus récent pour nous.

Vous le réalisez banché ou projeté ?

Uniquement en projection.

Sans parler d'isoler des murs en pisé, as-tu en tête des exemples où le terre paille ou terre chanvre a été mis en place à l'extérieur en ITE ?

Oui, nous sommes en train de réaliser une isolation extérieure en terre allégée sur un projet neuf : « le collège innovant de Béthoncourt », près de Montbéliard. Il s'agit d'une terre-chanvre avec intégration de terre du site et isolation projetée sur 15 cm d'épaisseur, couvrant une surface de 150 m². C'est notre premier grand chantier en isolation extérieure en terre allégée, et nous en sommes au tiers du chantier.

Quel est la nature du mur sur lequel est réalisée cette isolation ?

Ce sont des murs en ossature bois avec une isolation de 220mm de fibre de bois dans l'ossature et un doublage intérieur en méga BTC de 20cm d'épaisseur.

Sur quelle épaisseur peux-tu réaliser la projection ?

L'épaisseur est très variable et dépend du thermicien, mais en général, on peut projeter de 4 à 40 cm d'épaisseur avec des renforcements appropriés. Nous devons mettre une ossature secondaire en bois à partir de 8 cm d'épaisseur pour le terre-chanvre et 12 cm pour le chaux-chanvre. Cette ossature est principalement destinée à maintenir la matière en place pendant le séchage.

Quel enduit de finition sur le terre-chanvre ?

Sur le chantier du collège de Béthoncourt, par exemple, nous appliquons un lait de chaux sur le terre-chanvre, puis un gobetis de chaux, suivi d'un cœur d'enduit et d'une finition à la chaux.

Est-ce possible pour toi de projeter un mélange terre-paille plutôt qu'un terre-chanvre ?

Cela pourrait peut-être fonctionner avec de la paille broyée. La paille longue ne peut pas être mécanisée. Il est important de comprendre la nature des matériaux. La paille est une fibre, tandis que la chènevotte est un granulat, ce qui signifie que l'une est fine et l'autre très épaisse. Pour la paille, il faut plus de liant, ce qui peut potentiellement affecter les performances du mélange, car plus d'eau devra être ajoutée, ce qui ne facilite pas le processus de séchage.

Quels points de vigilance ou d'attention doit-on observer avec ces matériaux ?

Pour la terre, le problème majeur n'est pas la tenue, mais le séchage, ainsi que la préparation du support.

ANNEXE 22

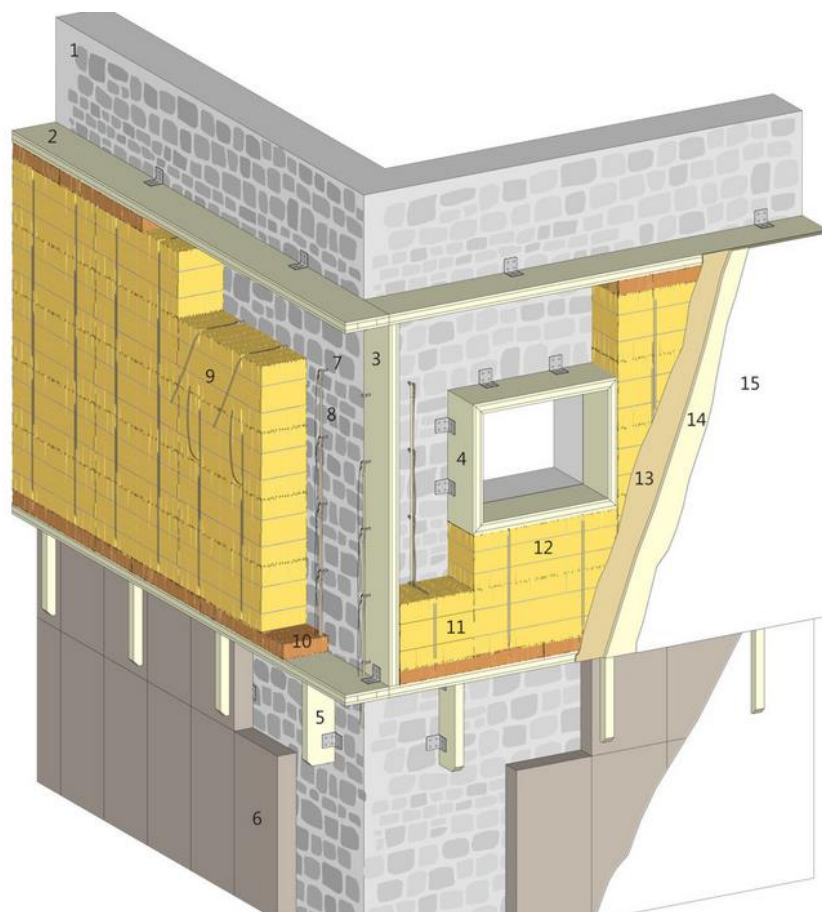
Pose en bretelle de l'isolation botte de paille

Source : <https://topophile.net/savoir/des-bretelles-pour-un-manteau-de-paille/>

Technique Bretelles

Les niveaux R+1 et R+2 mettent en oeuvre la technique dite « bretelles », sur 14 rangs de bottes accrochées sur chant.
Les bottes utilisées ont pour longueur 115 cm, pour un canal de 35 x 49 cm

- 1 Mur existant, moellons de pierres tendres
- 2 Lisse haute isolée, entre système bretelles et système épines
- 3 Caisson d'angle isolé
- 4 Précadre isolé, support de la nouvelle menuiserie
- 5 Consoles de maintien de la lisse basse
- 6 Vêtire liège en Rez-de-chaussée, imputrescible
- 7 Anneaux d'ancrages, chevilles nylon
- 8 Feuillards polyester en attente
- 9 Bottes liaisonnées deux à deux (système redondant)
- 10 Remplissage fibre de bois
- 11 Botte raccourcie en longueur, reficelée
- 12 Botte raccourcie en hauteur, sciée
- 13 Barbotine argile-chaux
- 14 Couche de corps chaux-sable
- 15 Couche de finition chaux-sable



ANNEXE 23

Les référentiels de technique courante

Source : guide Apave matériaux biosourcés

Documents Techniques Unifiés (DTU)

Bois	<ul style="list-style-type: none">• DTU 31.1: Charpente en bois• DTU 31.2: Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois• DTU 31.3: Charpentes en bois assemblées par connecteurs métalliques ou goussets• DTU 31.4: Facades à ossature bois• DTU série 51: Parquets en bois, planchers en bois et platelages extérieurs en bois
Lames et bardaux bois / Panneaux à base de bois	<ul style="list-style-type: none">• DTU 41.2: Revêtements extérieurs en bois
Pierre	<ul style="list-style-type: none">• DTU 20.1: Ouvrages en maçonnerie de petits éléments• DTU 40.11: Couvertures en ardoises naturelles• DTU 52.2: Pose collée des revêtements céramiques et assimilés - Pierre naturelles• DTU 52.2: Revêtements muraux attachés en pierre mince

Règles Professionnelles acceptées par la C2P

Pierre sèche (REX)	Technique de construction des murs en pierres sèches (Règle professionnelle novembre 2012)
Chanvre (REX)	Exécution d'ouvrages en béton chanvre : mur en béton de chanvre, isolation de sol en béton de chanvre, isolation de toiture en béton de chanvre, enduits en mortier de chanvre (Règle professionnelle juillet 2012)
Terre crue (REX)	Mise en œuvre des enduits sur supports composés de terre crue (Règle professionnelle mars 2012)
Paille	Construction en paille, remplissage isolant et support d'enduit (Règle professionnelle CP 2012 révisé, 3 ^e édition, RFCP)

ANNEXE 24-25

Les dispositifs constructifs des principes constructifs répertoriés en ITE

1-Isolants insufflés (Fibre de bois en vrac, liège en vrac, Paille en vrac, chènevotte, ouate de cellulose et textile recyclé en vrac)

- Pose d'une ossature bois ou métallique standard
- Pose d'une membrane type pare-pluie pour retenir l'isolant et limiter la pénétration de l'eau de pluie
- Insufflation de l'isolant dans les caissons
- Pose d'un contre-liteau = vide technique et préservation de la membrane
- Pose d'une plaque recevant une finition (pas de finition à l'enduit possible directement sur isolant) ou pose d'un panneau recevant un enduit

Une variante existe dans le cas où l'isolant vrac est projeté sous sa forme humide, comme avec la ouate de cellulose. Dans ce cas, si la membrane n'est pas nécessaire, le caisson est directement refermé par une plaque de Fermacell, par exemple.

Il est également possible de remplacer la membrane par une plaque rigide type fibre de bois et de l'enduire directement. Dans ce cas l'insufflation se fait entre le mur en pisé et la plaque rigide.

2-Panneau de laine végétale (laine de bois, laine de chanvre, panneau en ouate de cellulose, panneaux et rouleaux en coton recyclé, laine de moutons)

- Pose d'une ossature bois ou métallique standard
- Pose de l'isolant, idéalement 2 couches croisées
- Pose d'un contre-liteau = vide technique et préservation de la membrane
- Pose d'une plaque recevant une finition ou d'un bardage (pare-pluie fixé sur les montants, contre liteau et lame d'air)

3-Panneaux rigides à forte densité (panneaux de fibre de bois rigide, panneaux de liège, panneaux rigides de paille, panneaux rigides de roseaux)

- Pose d'une ossature secondaire et isolation encastrée ou isolation collée (à l'aide d'un mortier de terre par exemple) et fixation avec des chevilles à expansion.
- Pose d'un corps d'enduit armé d'une toile minérale ou végétale
- Pose d'un enduit de finition à la chaux

4-Boîte de paille⁵⁸

- Pose d'une ossature bois ou métallique standard et pose de l'isolant encastré.
- Pose d'un bardage rapporté ou d'un enduit de finition à la chaux directement sur isolant

Une variante est possible avec le système en bretelle, qui ne nécessite pas d'ossature secondaire (voir annexe n°22).

5-Isolants végétaux à projeter⁵⁹ (Terre paille hachée, terre chanvre, chaux chanvre)

- Nécessite une ossature secondaire en bois rapporté
- Projection du béton en fortes épaisseurs (couramment 15 cm)
- Réalisation de l'enduit après séchage du béton isolant ou de la terre allégée

⁵⁸ 'Les Règles Professionnelles'.

⁵⁹ Construire en Chanvre.

ANNEXE 24-25

Les dispositifs constructifs des principes constructifs répertoriés en ITE

6-Isolants végétaux à bancher (Terre allégée et chaux chanvre)

- Nécessite une ossature secondaire en bois rapporté
- Tasser ou couler le mélange dans des banches
- Réalisation de l'enduit après séchage du béton isolant ou de la terre allégée

7-Bloc de béton végétal préfabriqué (bloc de chaux -chanvre, brique de terre allégée)

- Pose des blocs en quinconce, assemblés par collage (par exemple, pour les blocs IsoHemp en chaux-chanvre, ils sont collés à l'aide d'un mortier-colle en joint mince de 3mm). Peut nécessiter la mise en œuvre d'équerre de renfort pour éviter le déversement, ainsi que des éléments structurels verticaux en bois.
- Coulinage d'un mortier maigre de chaux à l'arrière pour éviter de laisser un vide
- Réalisation de l'enduit, de préférence enduit chaux