



HAL
open science

Analyse bibliographique préliminaire à l'étude du Comportement multifonctionnel de PArois Complexes géo et bio-Sourcées (ANR PACS+)

Olivier Ple, Manon Girerd, Noémie Prime

► **To cite this version:**

Olivier Ple, Manon Girerd, Noémie Prime. Analyse bibliographique préliminaire à l'étude du Comportement multifonctionnel de PArois Complexes géo et bio-Sourcées (ANR PACS+). Rencontres Universitaires de Génie Civil le Havres 2024, May 2024, Le Havres, France. pp.229-239. hal-04593633

HAL Id: hal-04593633

<https://hal.science/hal-04593633v1>

Submitted on 3 Jun 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.

Analyse bibliographique préliminaire à l'étude du Comportement multifonctionnel de PArois Complexes géo et bio-Sourcées (ANR PACS+)

Girerd Manon¹, Plé Olivier¹, Prime Noemie¹

¹ Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR 5271, LOCIE, 73370 Le Bourget du Lac, France

RESUME Le pisé est un matériau complexe qui connaît un regain d'intérêt en construction à cause de sa faible empreinte environnementale. Cependant, ce matériau présente des spécificités, notamment sa sensibilité à l'eau, sa capacité mécanique modérée et une conductivité thermique qui ne peut garantir un confort d'hiver suffisant. Pour en faire des parois réglementaires il faut donc l'isoler. Pour le pisé, il est naturel de l'associer à des isolants bio-sourcés. L'objectif de ce travail est d'étudier les solutions d'isolation les mieux adaptées au pisé. Après l'étude des solutions technologiques qui ne dégradent pas les fonctionnalités initiales du pisé, le travail bibliographique se concentrera sur l'analyse thermo-hygro-hydro-mécanique de l'interface, lieu de tous les couplages.

Mots-clefs Pisé, isolant bio-sourcé, interface, comportement thermo-hygro-hydro-mécanique

Modalité de présentation Présentation orale

I. INTRODUCTION

Le secteur de la construction est l'un des plus impactant sur l'environnement [Ahmed Ali et al., 2020]. Notamment, 12% des émissions de gaz à effets de serre sont liées à la fabrication des liants hydrauliques en France (ciment, plâtre, chaux). Pour atteindre une neutralité carbone d'ici 2050 [TheShiftProject, 2021] la recherche qui concerne les matériaux de construction bas carbone est capitale, d'autant plus avec la mise en application de la RE2020. Dans ce contexte, le bâti en terre crue - procédé traditionnel, très ancien, durable et renouvelable – qui représente encore 15% du patrimoine architectural bâti en France [Fontaine and Anger, 2009], connaît un regain d'intérêt. Même si les procédés de construction en terre crue sont très variés et adaptés à chaque secteur géographique en fonction de la nature des sols [Houben et al., 1989], nous avons choisi, pour le projet ANR PACS+ de nous concentrer sur le procédé de construction de type pisé, très courant en Auvergne Rhône Alpes et qui présente un bon bilan environnemental (matériau local, mise en œuvre artisanale, matériau recyclable). Il a été démontré dans [Ben Alon, 2020] que les assemblages en terre réduisent la demande d'énergie grise de 62 à 68%, le potentiel de changement climatique de 83 à 86%, l'acidification de l'air de 58 à 95% et la pollution particulaire de 84 à 99% en comparaison à des solutions « conventionnelles ». A titre comparatif le pisé non stabilisé avec terre issu du site a un impact carbone de 10 kgeqCO₂/UF contre 42 kgeqCO₂/UF pour le béton armé selon les fiches FDES issus de la base INIES [AIA, 2023].

D'un point de vue hygrothermique, le pisé constitue un système de régulation à cycles quotidiens et saisonniers, accumulant ou dégageant chaleur et vapeur d'eau [Heitz et al., 2015]. En hiver, le matériau présente des propriétés de confort thermique très moyennes. D'un point de vue mécanique, les parois en terre crue sont moins résistantes à la compression uniaxiale qu'une paroi en matériaux conventionnels. En définitive, le matériau pisé seul, ne peut pas répondre aux exigences de rénovation thermique minimales (réglementation thermique en vigueur pour les bâtiments existant en rénovation et RE2020 en neuf) et aux exigences mécaniques des constructions à plus de deux étages (sans chaînage vertical) [Le Tiec and al., 2020]. Une réflexion est donc à mener sur la réalisation d'un complexe pisé-isolant résistant et durable.

II. LE PISE

Le pisé utilisé en construction est un mélange variable d'argile, de limon, de sable et de gravier caractérisé par une granulométrie très étalée. Le matériau est hétérogène et multiphasique (grains, air, eau) [Soudani, 2016] et l'argile y joue un rôle déterminant (cohésion et sensibilité à l'eau). En même temps, comme tous les matériaux hétérogènes à comportement plutôt fragile en régime permanent, le pisé présente des effets d'échelle important. En effet, depuis Leonardo Da Vinci et la théorie du maillon le plus faible, il est parfaitement connu que tous les matériaux hétérogènes présentent des effets d'échelle comme le montre les publications de C.C. Vu [CC Vu et al., 2018] sur l'exemple du béton. Le pisé n'échappe pas à cette règle. En particulier, il n'y a pas, à proprement parler, de volumes élémentaires représentatifs sur ce matériau.

Comportement mécanique et hygrothermique du pisé

Les murs en pisé mesurent en moyenne 50 cm d'épaisseur [Bui, 2008], 30 cm minimum selon [GDP, 2018] avec une densité moyenne de l'ordre de 2000 kg/m³. Si mécaniquement la terre est assez peu résistante à la compression uniaxiale (entre 0,9 et 1,7 MPa pour le pisé [GDP 2018]), faiblement résistante en cisaillement [El-Nabouch et al., 2018] et en traction directe, elle présente une réponse assez performante vis-à-vis du risque sismique [El-Nabouch et al., 2019](cf. Fig. 1).

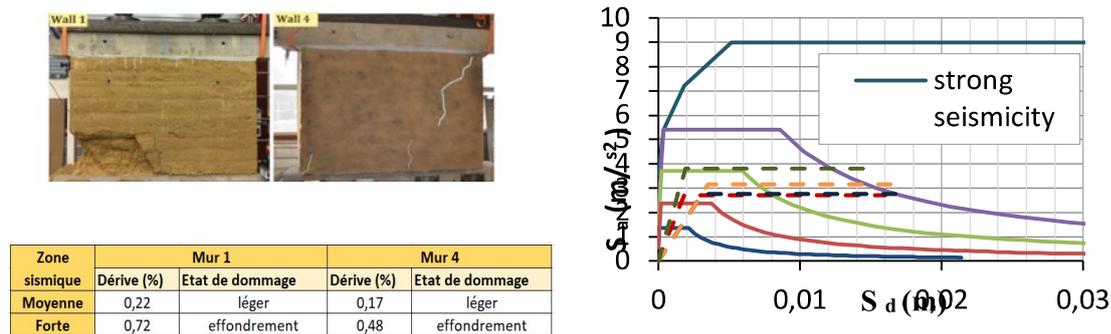


FIGURE 1. Capacité sismique de murs en pisé selon la méthode push over, [El-Nabouch et al, 2019]

Thermiquement, la terre présente une conductivité thermique assez élevée (1 W/m/K), une capacité thermique importante (pour 2000 kg/m³ la capacité thermique est de 1800 kJ/m³°C) et une très bonne inertie thermique. Ces propriétés confèrent à la construction terre une isolation d'hiver

plutôt moyenne mais un excellent confort d'été [Dong et al., 2014]. La consommation d'énergie dans un bâtiment en pisé non isolé en été est donc moindre en comparaison d'un bâtiment conventionnel [Paul and Taylor, 2008]. Cependant, au vu de la conductivité thermique du pisé, ces parois ne peuvent à elles seules garantir un confort d'hiver suffisant [Dong et al., 2015]. En réhabilitation et en site occupé, une isolation thermique par l'extérieur semble une solution adéquate. En effet, en isolant par l'extérieur les murs en pisé, [Taylor et al., 2008] et [Soebarto, 2009], obtiennent des températures intérieures acceptables en hiver. En ajoutant une isolation en fibro-ciment [Soebarto, 2009] obtient un gain de 5 degrés en intérieur en hiver, tandis que [Taylor et al., 2008] montrent, par simulation numérique, qu'un ajout d'isolation thermique par l'extérieur permet de réduire de 78% la chaleur perdue à travers le mur. De plus, en utilisant de la fibre de bois en isolation extérieure, [Serrano et al., 2016] ont montré que l'on pouvait améliorer le décalage thermique du mur et même réduire davantage les températures intérieures en été.

Le pisé a une résistance à la diffusion à la vapeur d'eau plutôt faible (comprise entre 5 et 13) et une excellente capacité de tampon hydrique MBV comprise entre 1.0 et 3.7 g/ (m².% HR) [Arrigoni et al., 2018]. Ainsi, l'eau contenue dans l'air ambiant peut être adsorbée sur les surfaces de grains accessibles, et condenser dans les pores par le phénomène de condensation capillaire. Plus il y a de porosité et plus ces pores sont fins, plus la terre peut se charger en humidité [Moevus et al., 2013]. On trouve dans la littérature des valeurs moyennes de porosité comprises entre $\eta = 0.200$ et 0.437 [Anglade, 2022], [Chabriac, 2014], [Indekeu, 2023], [Losini, 2018]. Ces valeurs présentent une forte variabilité, elles dépendent notamment de la force de compaction appliquée à la mise en œuvre, de la classe granulaire et des argiles présentes dans le mélange. La porosité totale est à coupler avec la répartition porale au cas par cas, car cette dernière aura une grande influence sur le comportement du matériau, en particulier sur les phénomènes de remontées capillaires. La terre a donc la capacité d'absorber et de désorber l'humidité rapidement et dans une plus grande mesure que tout autre matériau industriel de construction [Ávila et al., 2021]. En effet, dans son étude, [Saidi, 2019] montrent que des matériaux en terre crue sont plus hygroscopique que les matériaux stabilisés au ciment ou à la chaux. Enfin, le pisé est un matériau dit « capillaire ». Bien que le coefficient d'absorption capillaire soit difficile à mesurer sur ce matériau (le pisé imbibé d'eau se désagrège et rend complexe la manipulation pour mesurer ce facteur), sa valeur est comprise entre $0,2 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ et $0,62 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ [Indekeu, 2023], [Chabriac, 2014]. Ce facteur est variable en fonction de la répartition porale du matériau. Grâce à ces phénomènes couplés le pisé se comporte donc comme un régulateur hygrothermique [Chabriac, 2014].

Effets de l'eau sur le pisé

Dans des conditions normales de température et de pression, avec une humidité relative inférieure à 70 %, la teneur en eau massique dans les murs en terre varie généralement entre 0,5 et 5 %. Cependant, l'accumulation excessive d'eau dans le matériau pisé entraîne une détérioration des résistances mécaniques de ce dernier [Morel et al., 2021], [Chauhan et al., 2019], [Heitz and al., 2015] et peut amener le matériau à la rupture. Le matériau se comporte comme un milieu non saturé où la succion matricielle contrôle le comportement mécanique [Chauhan et al., 2019]. Il passe d'un comportement quasi-fragile à un comportement ductile [Chauhan et al., 2019]. La

présence d'eau diminue également la résistance thermique du pisé [Hall and Allinson, 2009]. La sensibilité du matériau à l'eau est donc un frein à son développement généralisé [Bui, 2008].

III. RISQUES ET RECOMMANDATIONS POUR L'ISOLATION DU PISÉ

Limitation de l'état de l'art

Il n'existe pas de certitude quant à la manière la plus appropriée d'isoler le pisé. Ce qui probablement constitue, là aussi, un frein à son isolation. Les systèmes actuels mis en œuvre ne bénéficient d'aucune validation scientifique [Heitz et al., 2015]. Nous avons répertorié cinq études de simulation hygrothermique concernant l'isolation du matériau terre crue, dont deux réalisées pour des murs en pisé [Cerema Est et al., 2013], [Indekeu, 2023], deux pour du torchis [SolaresBauen, 2014], [ENERTECH SCOP, 2017] et une pour la BTC [Giuffrida, 2024]. Aucune de ces études ne présentent de résultats expérimentaux. L'isolation par l'extérieur n'est abordée que dans deux des cinq études. Les problématiques d'humidité liées à l'ajout d'isolant semblent être plus étudiées en isolation par l'intérieur car c'est dans ce cas de figure que le risque est maximal [Cerema Est et al., 2013].

Risques de pathologie humide dans le pisé

Historiquement, les principaux désordres constatés sont liés à des problèmes d'humidité (cf. Fig 4.) [Le Tiec et al., 2020], [Indekeu, 2023]. Le matériau pisé étant perméable à la vapeur d'eau, hygroscopique et capillaire, la paroi est soumise à de nombreuses infiltrations (liquide ou vapeur) (cf. Fig. 2). Les principaux risques liés à l'ajout d'un isolant contre un mur en pisé sont une apparition de condensation au sein de la paroi, un emprisonnement de la vapeur d'eau dans le pisé dû à l'utilisation de matériaux en applique trop fermés ou un emprisonnement d'eau liquide par intempéries ou remontées capillaires qui entrainerait une dégradation des propriétés mécaniques pouvant aller jusqu'à l'effondrement du mur en pisé (cf Fig.3). La conception de l'isolation devra donc garantir un état hydrique équilibré pour éviter toutes conséquences néfastes (cf. Fig.4).

- N°1 : Intempéries et infiltration d'eau liquide
- N°2 : Remontées capillaires (eau liquide)
- N°3 : Vapeur d'eau et eau liquide contenue dans le matériau pisé
- N°4 : Apport d'eau liquide suite dégâts des eaux (anecdotique)
- N°5 : Vapeur d'eau contenu dans le logement

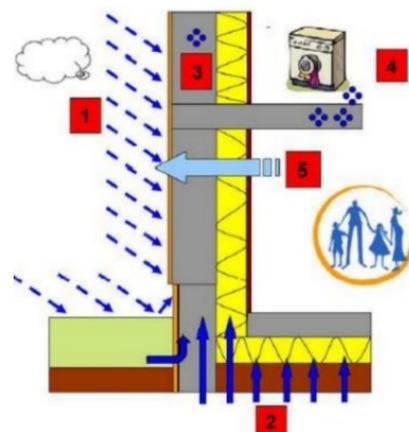


FIGURE 2. Sources d'humidité dans le pisé [Energence, 2019]

Recommandations

Pour limiter les risques précédemment décrits, les matériaux isolants mis en œuvre doivent être plus ouverts à la migration de vapeur d'eau à l'extérieur qu'à l'intérieur [ENERTECH SCOP, 2017], [AQC, 2023]. C'est pourquoi on retrouve des enduits à la chaux perméable à la vapeur d'eau en extérieur. La lame d'air à l'interface pisé/isolant est à éviter car elle ne permet pas d'assurer la continuité capillaire [Tardy et al., 2016]. De ce fait, les isolants permettant d'épouser la forme du mur sont à prioriser. Pour isoler le pisé, il est par ailleurs préférable d'avoir recours à une isolation par l'extérieur qui offre de meilleures performances (suppression des ponts thermiques, inertie conservée, risque de condensation diminué, protection du pisé à la pluie et au gel) [Cerema Est et al., 2013]. Dans ce cas de figure, l'étude HYGROBA [Cerema Est, 2013], préconise d'utiliser des matériaux perméables à la vapeur d'eau sur au moins une des deux faces du mur en pisé.

Lorsque l'isolation par l'extérieur n'est pas possible, l'isolation par l'intérieur est requise mais elle nécessite une attention particulière car elle augmente le risque de condensation à l'interface [Cerema Est et al., 2013]. Ainsi, un frein vapeur est souvent mis en place à la surface de l'isolant. Il présente cependant l'inconvénient d'impacter considérablement la capacité de séchage et d'échange hygrothermique du mur avec l'ambiance intérieure. C'est pourquoi des solutions de type « corrections thermiques » (béton végétal mis en œuvre en intérieur selon épaisseur disponible), sont répertoriés comme des solutions de référence [Moriset et al., 2018]. D'ailleurs, des simulations hygrothermiques réalisées sur des murs en terre crue (pisé et torchis) montrent que les résultats sont en faveur des matériaux à la fois perméables à la vapeur d'eau, capillaires et hygroscopiques [Indekeu, 2023], [Cerema Est et al., 2013], [ENERTECH SCOP, 2017], [SolaresBauen, 2014]. En se basant sur les éléments précédents, il semble primordial de se tourner vers des isolants biosourcés ou bio-géo sourcés pour leur nature hygroscopique et perméable à la vapeur d'eau. De plus, ces matériaux sont bas carbone.



FIGURE 3. Effondrement structurel dû à une rénovation inappropriée [Indekeu, 2023]

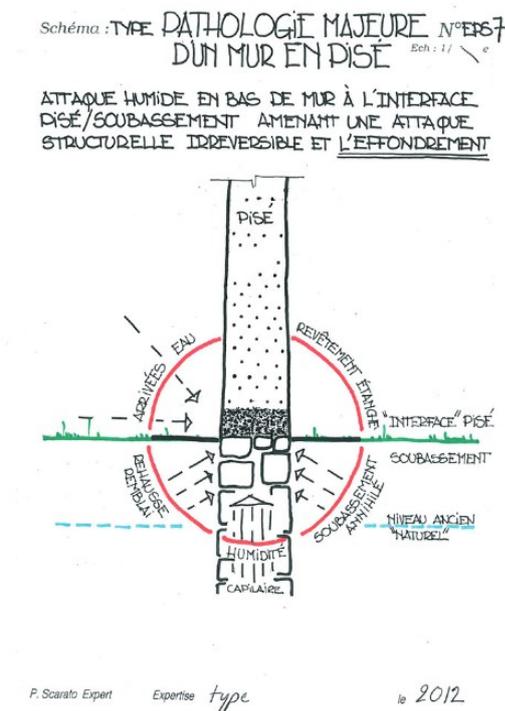


FIGURE 4. Pathologie majeure des murs en pisé [Scarato, 2014]

IV. SOLUTIONS D'ISOLATION REFERENCEES

Typologie des isolants et assemblages pisé-isolants

Trois possibilités d'isolation ont été répertoriées dans la littérature pour des murs en pisé ; l'isolation par l'intérieur (ITI), l'isolation par l'extérieur (ITE) ainsi que l'isolation mise en œuvre en sandwich entre deux épaisseurs de pisé (isolation réalisée sur le projet du Campus de l'entreprise Alnatura en Allemagne avec mise en œuvre d'un isolant pisé au centre de la banche). Cette troisième typologie semble très anecdotique. On peut classer les isolants biosourcés et bio-géo-sourcés pour l'isolation du pisé selon deux catégories ; les isolants « légers » sous forme de fibres et les isolants « à matrice » qui allient une fibre à un liant [Moriset et al., 2018]. Les isolants à matrice ont bien souvent une conductivité thermique plus faible que les isolants légers (pour un chaux-chanvre de conductivité thermique 0.065 W/mK il faut environ 20 cm pour atteindre une résistance thermique de $3.2 \text{ m}^2\text{K/W}$ contre 12.8 cm pour une fibre de bois de 0.04 W/mK). De ce fait, une épaisseur plus conséquente d'isolant sera à mettre en œuvre avec ces matériaux. Cependant, à titre comparatif le chaux-chanvre a une valeur de teneur en eau de référence à 80% d'humidité relative de 30 kg/m^3 contre 7 kg/m^3 pour la laine de bois et une valeur de coefficient d'absorption liquide de $0.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ contre $0.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour la laine de bois. Il semblerait donc que les caractéristiques très hygroscopiques et capillaires des isolants à matrice (ou bétons végétaux) soient favorables à l'équilibre hydrique du pisé et ainsi permettent potentiellement de se passer d'un frein vapeur en application intérieure. Ces isolants ont déjà fait leur preuve dans le

cadre de rénovation de bâtiment ancien : c'est le cas de l'étude réalisée par [Almeida, 2022] où un isolant de type béton de chanvre est mis en œuvre pour isoler des murs en brique cuite. Des mesures in situ et des simulations hygrothermiques (Outil Delphin) soulignent l'obtention d'un meilleur déphasage avec un tel matériau en comparaison d'une isolation plus classique en polystyrène. De plus, les isolants matricés pourraient jouer un rôle structurel et augmenter la résistance horizontale et verticale du complexe. En résumé, les solutions type « béton végétal » semblent pertinentes pour isoler un mur en pisé par l'intérieur afin de se passer de frein vapeur, de garantir la continuité des échanges et limiter les pathologies humides. Dans [Giuffrida, 2024], il apparaît qu'en conditions dynamiques, les isolants thermiques plus massifs appliqués à l'extérieur comme le chaux-chanvre sont plus performants que les isolants légers comme la bagasse de canne à sucre (comportement hygrothermique plus stable). Cependant les solutions de type « légères » semblent pertinentes pour une isolation par l'extérieur avec une emprise en épaisseur réduite qui limite la perte de luminosité comparativement à une solution de type béton végétale. Dans cette catégorie, la solution « fibre de bois » constitue une solution de référence répandues [Heitz et al., 2015]. Une synthèse des positionnements et natures des isolants possibles est présentée ci-après (cf tableau 1).

Choix des matériaux isolants

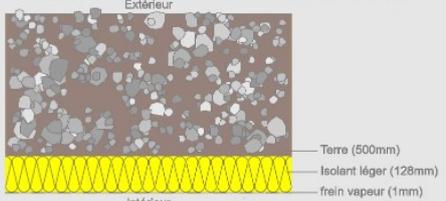
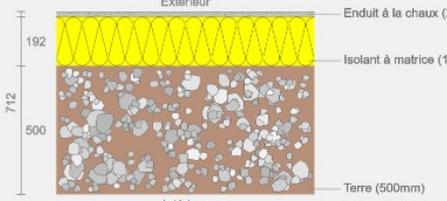
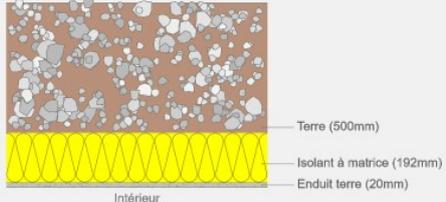
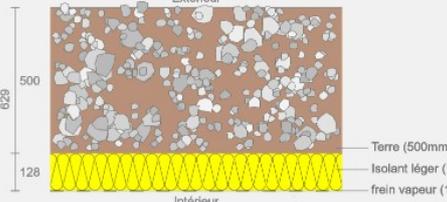
Parmi les isolants biosourcés, les co-produits de l'agriculture ont les impacts carbone les plus faibles [Cerema, 2011], [Dickson and al, 2021]. Dans l'optique de la neutralité carbone, les isolants étudiés dans le projet seront donc des co-produits de l'agriculture tel que la paille, le chanvre, le roseau ainsi que des liants tel que la terre ou la chaux. Une solution de référence tel que la fibre de bois pourra être utilisée comme élément de comparaison. Au vu des enjeux soulevés il semble pertinent de mettre à l'étude et de comparer au moins une isolation « légère » (laine de chanvre, botte de paille, panneaux de paille, panneaux de roseaux) ainsi qu'une isolation à « matrice » (terre allégée, chaux chanvre), à la fois pour des isolations intérieures et extérieures. Pour les isolants à matrice, différentes mises en œuvre (projeté, banché ou collé) seront étudiées afin de garantir la meilleure adhésion à l'interface.

Le cas particulier de la terre allégée

La terre allégée est un béton végétal qui est un matériau d'avenir de par son faible impact environnemental. En effet, il permet la revalorisation de sous-produits agricoles tels que la paille ou le chanvre. Différentes études ont été dernièrement menées [Brouard, 2018], [Vincelas, 2019], [Azil, 2022] et permettent de valider l'utilisation de ce matériau comme isolant. De plus, le projet CobBauge étudie la possibilité d'isoler un mur en bauge (terre porteuse) avec une terre allégée en prêtant une attention particulière aux cinétiques de séchage du complexe [Azil, 2022]. Enfin, [Douillet et al., 2010] a montré qu'un matériau « terre-chanvre » pouvait concurrencer un matériau chaux-chanvre du point de vue mécanique. De plus, [Mazhoud, 2017], montre que les formulations à base de terre sont d'excellents régulateurs hygriques et présentent des performances légèrement supérieures à celles des bétons de chanvre. Dans l'optique de recherche d'un isolant compatible avec le pisé, la terre allégée semble être un isolant de premier choix de

par son impact environnemental et son liant « terre » qui pourrait favoriser les transferts couplés avec le matériau pisé (ce point sera à vérifier dans le cadre de la recherche). Les principaux freins au développement de « la terre allégée », soulignés dans les différentes études, semblent être liés au séchage, à la sensibilité à l'eau (durabilité) et au risque de moisissure.

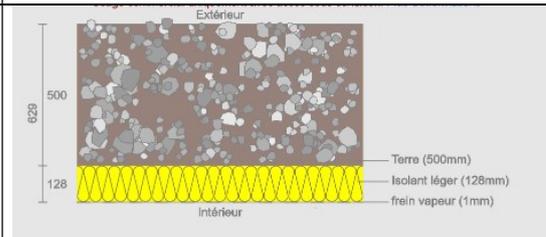
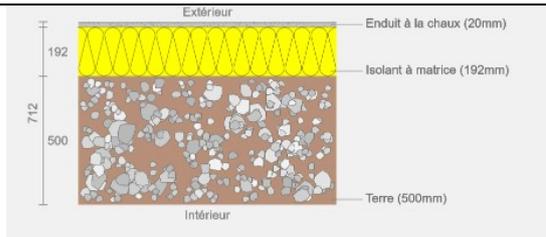
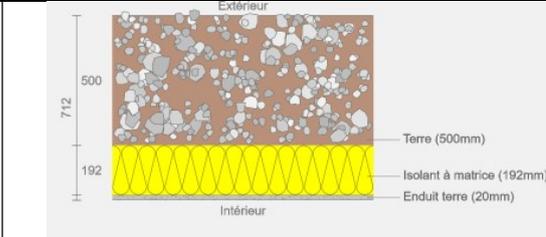
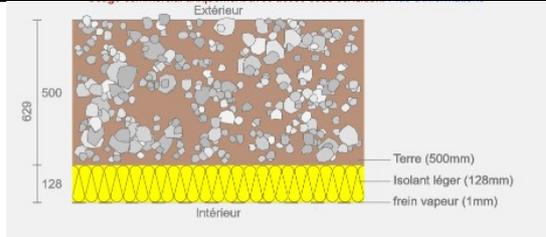
TABLEAU 1. Synthèse des assemblages pour isoler le pisé selon le positionnement et la nature des isolants biosourcés et bio-géo-sourcés

	ITI			ITE		
	Mise en œuvre de l'isolant	Isolants	Finition sur isolant	Mise en œuvre de l'isolant	Isolants	Finition sur l'isolant
Isolation biosourcée « légère »						
	A. Collé (mortier de terre ou colle chimique)	Isolant rigide en panneaux : Fibre de bois, panneaux de roseaux, panneaux de paille	Frein vapeur ou enduit	H. Collé et fixé mécaniquement (crochet, équerre ou rosace pour isolant)	Isolant rigide/ semi-rigide : Fibre de bois, panneaux de roseaux, panneaux de paille	Enduit
	B. Déroulé et fixé dans ossature	Isolants souples en panneaux : Laines (bois, chanvre, mouton, ...) ou ouate de cellulose	Frein vapeur	I. Compressé dans ossature	Isolant rigide/ semi-rigide : Botte de paille	Enduit Bardage
	C. Insufflé dans caissons derrière pare vapeur	Isolant vrac : Ouate de cellulose, fibre bois, paille fine	Frein vapeur	J. Déroulé et fixé dans ossature	Isolant souple : Laines (bois, chanvre, mouton ...) ou ouate de cellulose	Bardage
D. Projeté contre ossature	Isolant vrac « voie humide » : Ouate de cellulose	Frein vapeur	K. Insufflé dans caisson	Isolant en vrac sec : Ouate de cellulose, fibre de bois, paille hachée	Bardage	
Isolation biosourcée avec « matrice »						
	E. Compacté entre banche par voie humide contre ossature	Isolants « voie humide » : Terre allégée, chaux-chanvre	Enduit	M. Compacté entre banche par voie humide contre ossature	Isolants « voie humide » : Terre allégée, chaux-chanvre	Enduit
	F. Projeté par voie humide contre ossature	Isolants « voie humide » : Terre chanvre, chaux-chanvre	Enduit	N. Projeté par voie humide contre ossature	Isolants « voie humide » : Terre chanvre, chaux-chanvre	Enduit
G. Collé et fixé mécaniquement (crochet, équerre ou rosace pour isolant)	Isolants rigides en panneaux ou briques : Terre allégée, chaux-chanvre, silicate de calcium	Enduit	O. Collé et fixé mécaniquement (crochet, équerre ou rosace pour isolant)	Isolants rigides en panneaux ou briques : Terre allégée, chaux-chanvre, silicate de calcium	Enduit	

V. ENJEUX DE LA RECHERCHE

Un tableau contenant les questions scientifiques (cf. tableau 2) a été réalisé. Ces problématiques ont été classées en fonction de la nature de l'isolant (léger ou à matrice) et de la position (intérieur ou extérieur) de ce dernier.

TABLEAU 2. Synthèse des enjeux et questions scientifiques

	ITI	ITE
Isolation biosourcée Légère		
	<p>-A l'interface isolant/terre quelle est la dynamique de transfert hydrique en cas de condensation selon les propriétés de l'isolant (perméabilité à la vapeur, hygroscopicité, capillarité)? Le flux de drainage capillaire à travers l'isolant et le mur permet-il de compenser le flux de vapeur et de condensation entrante ?</p> <p>-Selon le type de matériau isolant quelle est l'épaisseur limite à partir de laquelle la condensation apparaît effectivement à l'interface ?</p> <p>-Une isolation étanche à l'intérieur, nuit-elle à un état hydrique équilibré dans le pisé (séchage par l'extérieur seulement) ?</p>	<p>-A l'interface isolant/ terre quelle est la dynamique de transfert hydrique selon les propriétés de l'isolant (perméabilité à la vapeur, hygroscopicité, capillarité) ?</p> <p>-Une isolation étanche à l'extérieur, nuit-elle à un état hydrique équilibré dans le pisé (séchage par la face intérieure seulement) ?</p>
Isolation biosourcée avec matrice		
	<p>-A l'interface, la présence de la matrice minérale, qui modifie les propriétés (perméabilité vapeur, hygroscopicité et capillarité), change-t-elle significativement le bilan hydrique ? Cette modification est-elle plus significative en application intérieure ou extérieure ?</p> <p>-La présence de la matrice permet-elle de modifier la résistance au cisaillement ? Quelle est l'effet de la mise en œuvre (projeté, banché, collé) sur la résistance au cisaillement à l'interface ? Peut-on dans certains cas se passer d'ossature pour avoir un isolant autoportant ?</p> <p>-La présence d'un isolant à matrice peut-elle améliorer la réponse au contreventement du mur en pisé ?</p> <p>-Quels sont les risques d'apparition d'activité biologique dans le cas de mise en œuvre sous forme humide ?</p> <p>-Selon le type de matrice quelle est l'épaisseur limite à partir de laquelle la condensation apparaît effectivement à l'interface ?</p>	<p>-Quelle est la durabilité d'un isolant à matrice mis en œuvre à l'extérieur ?</p>

VI. CONCLUSIONS

Dans le cadre de cette recherche plusieurs complexes isolants seront étudiés afin de fournir des résultats scientifiques sur lesquels se baser lors de l'isolation d'un mur en pisé. Les matériaux (pisé et isolants) seront fabriqués, optimisés et caractérisés à différentes échelles (interface, structurelle et bâti). Le premier objectif est de développer un béton végétal optimisé (qualités mécaniques, hygrothermiques et thermiques) qui permette d'isoler un mur en pisé. Le second objectif est de comparer les performances aux interfaces d'un tel isolant couplé au pisé (thermique, hydrique, mécanique) avec une solution d'isolation sans matrice (isolant léger). Pour ce faire des assemblages seront d'abord réalisés à l'échelle du muret pour une étude hygroscopique et thermique à l'aide d'une enceinte de conditionnement. Des mesures fines des champs d'humidité ou de teneur en eau aux interfaces seront réalisées ainsi que l'étude des cinétiques de séchage. Des essais mécaniques aux interfaces seront également réalisés. Dans un second temps, des assemblages à l'échelle de mur seront réalisés pour étudier l'influence de l'isolant sur la résistance mécanique du mur en pisé. Toutes ces études permettront de valider scientifiquement les solutions d'isolation proposées et de pouvoir être prescriptifs vis-à-vis des constructeurs.

VII. REMERCIEMENTS

Le projet PACS+ a été financé par l'ANR pour une durée de 4 ans. Il est constitué d'un consortium de deux universités, l'Université Clermont Auvergne et l'Université Savoie Mont Blanc. Nous tenons à remercier ici, Sofiane Amziane, Evelyne Toussaint, Omayma Homoro, Salah Ouldboukhtine de l'Institut Pascal pour leur collaboration étroite.

REFERENCES

- Ahmed Ali, K., Ahmad, M.I., Yusup, Y., 2020. Issues, Impacts, and Mitigations of Carbon Dioxide Emissions in the Building Sector. *Sustainability* 12, 7427.
- AIA life designers, et Ekopolis. 2023. Mieux concevoir et construire en terre crue : collection « Construire autrement ».
- Almeida, M.M. de, 2022. Etude de la rénovation hygrothermique de parois anciennes utilisant des matériaux biosourcés (phdthesis). INSA de Toulouse.
- Amziane, S., al. 2017a. Bio-aggregates Based Building Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM SpringerLink. URL <https://link-springer-com.univ-smb.idm.oclc.org/book/10.1007/978-94-024-1031-0> (accessed 1.19.24).
- Anglade, Elsa. 2022. « Évaluation des performances des matériaux en terre crue par homogénéisation poro-mécanique analytique non linéaire ».
- AQC, 2023. Maîtriser la migration de vapeur d'eau dans les parois.
- Arrigoni, A., Beckett, C.T.S., Ciancio, D., Pelosato, R., Dotelli, G., Grillet, A.-C., 2018. Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution. *Resources, Conservation and Recycling* 137, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.025>
- Ávila, F., Puertas, E., Gallego, R., 2021. Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review. *Construction and Building Materials* 270, 121435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121435>
- Azil, A., 2022. Etude des performances mécanique et hygrothermique des matériaux en terre et fibre végétale : application dans un bâtiment pilote (phdthesis). Normandie Université.
- Ben-alon, Lola. 2020. Natural Buildings: Integrating Earthen Building Materials and Methods Into Mainstream Construction. (phdthesis). Carnegie Mellon University.
- Brouard, Y., 2018. Caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat (phdthesis). École doctorale université de Tours.
- Bui, Q.-B., 2008. Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques (phdthesis). Lyon, INSA.
- Cerema, 2011. Synthèse bibliographique des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés. *Réhabilitation Bâti Ancien - CREBA*. URL <https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/espace-documentaire/synthese-bibliographique-des-etudes-sur-la-renovation-thermique-du-bati-ancien> (accessed 12.12.23).
- Cerema Est, ENSA Toulouse, INSA Toulouse, MPF, 2013. Etude hygroma.
- Chabriac, P.-A., 2014. Mesure du comportement hygrothermique du pisé (PhD Thesis). ENTPE; CNRS-LTDS (UMR 5513).

- Chauhan, P., El-Hajjar, A., Prime, N., Plé, O., 2019. Unsaturated behavior of rammed earth: Experimentation towards numerical modelling. *Construction and Building Materials* 227, 116646.
- Dethier, J., Doat, P., Guillaud, H., Houben, H., Anger, R., Bardagot, A.-M., Besnard, A., Davis, L., Eaton, R., Gandreau, D., Gasnier, H., Gauzin-Müller, D., Golvin, J.-C., Heringer, A., Moriset, S., Rakotomamonjy, B., Rauch, M., Sabatier, N., Van Damme, H., Wilson, A., 2019. *Habiter la terre : l'art de bâtir en terre crue traditions, modernité et avenir*. Flammarion, Paris.
- Dickson, T., et S. Pavia. 2021. « Energy Performance, Environmental Impact and Cost of a Range of Insulation Materials ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140: 110752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110752>.
- Dong, X., Griffith, M., Soebarto, V., 2014. Strategies for reducing heating and cooling loads of uninsulated rammed earth wall houses.
- Dong, X., Soebarto, V., Griffith, M., 2015. Design optimization of insulated cavity rammed earth walls for houses in Australia. *Energy and Buildings* 86, 852–863. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.014>
- Douillet, G.A., Zucha, W.J., Bernard, E., Kühnis, A., Toropovs, N., n.d. Earth Hemp and cementitious binders: a comparison of compressive strengths.
- El-Nabouch, R., Bui, Q.B., Plé, O., Perrotin P., 2018. Characterizing the shear parameters of rammed earth material by using a full-scale direct shear box. *Construction and Building Materials* 171, 414-420.
- El-Nabouch, R., Bui, Q.B., Plé, O., Perrotin, P., 2019. Rammed earth under horizontal loadings: Proposition of limit states. *Construction and Building Materials* 220, 238-244.
- ENERTECH SCOP, 2017. Migration d'humidité et de vapeur dans les parois du bâti ancien.
- Fabbri, A., Morel, J.C., Aubert, J.-E., Bui, Q.-B., Gallipoli, D., Ventura, A., Reddy, V.B.V., Hamard, E., Pelé-Peltier, A., Abhilash, H.N., 2022. An overview of the remaining challenges of the RILEM TC 274-TCE, testing and characterisation of earth-based building materials and elements. *RILEM Tech Lett* 6, 150–157. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.149>
- Fontaine, L., Anger, R., 2009. *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*, Edition coréenne. ed. Belin, Paris.
- GDP, 2018. *Guide de bonne pratique pisé*.
- Giuffrida, Giada, Letizia Dipasquale, Riccardo Maria Pulselli, et Rosa Caponetto. 2024. « Compared Environmental Lifecycle Performances of Earth-Based Walls to Drive Building Envelope Design ». *Sustainability* 16 (4): 1367. <https://doi.org/10.3390/su16041367>.
- Hall, M., Allinson, D., 2009. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment* 44, 1935–1942. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.007>
- Heitz, P., Morel, J.C., Fabbri, A., Soudani, L., Champire, F., Meunier, N., 2015. *L'isolation du pisé : pertinence et principes*. ENTPE, Vaulx en Velin.
- Houben, H., Guillaud, H., CRATerre, 1989. *Traité de la construction en terre*.
- Indekeu, M., 2023. *L'impact de l'isolation intérieure sur les performances hygro-thermiques des murs en pisé* (phdthesis), Chambéry.
- Le Tiec, J.-M., Misse, A., Dayre, M., Doat, P., Joffroy, T., 2020. *Construire en pisé : prescriptions de dimensionnement et de mise en oeuvre*. Le Moniteur, Antony.
- Losini, Alessia. 2018. « stabilisation du pisé par des déchets ou des matériaux recyclés et des additifs naturels ». (phdthesis), Chambéry. <https://www.theses.fr/s208741>.
- Mazhoud, Brahim. 2017. « Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés ». (phdthesis), Rennes, INSA. <https://theses.fr/2017ISAR0024>.
- Moevus, M., Fontaine, L., Anger, R., Doat, P., Couvreur, L., Cloquet, B., 2013. *Projet : Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) : synthèse à destination des responsables des politiques publiques*. CRATerre-ENSAG, Grenoble.
- Morel, J.-C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C., Bui, Q.B., 2021. Earth as construction material in the circular economy context: practitioner perspectives on barriers to overcome. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences* 376. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0182>
- Moriset, S., Joffroy, T., Mathilde, B., Hubert, G., Martin, P., Misse, A., 2018. *Réhabiliter le pisé*. Actes sud.
- Paul, W.L., Taylor, P.A., 2008. A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building. *Building and Environment* 43, 1858–1870. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.11.006>
- Pro climat, 2018. *Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'isolations thermiques dans les constructions en bois*.
- Saidi, Meriem, Amel Soukaina Cherif, B. Zeghmati, et Ezeddine Sediki. 2019. « Etude comparative de la capacité de sorption des matériaux de construction à base de terre ».
- Scarato, Pascal. 2014. « Bilan « expertal » du patrimoine en pisé, une architecture en terre crue à reconnaître ».
- Serrano, S., de Gracia, A., Cabeza, L.F., 2016. Adaptation of rammed earth to modern construction systems: Comparative study of thermal behavior under summer conditions. *Applied Energy* 175, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.010>
- Soebarto, V., 2009. *Analysis of indoor performance of houses using rammed earth walls*. IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009.
- SolaresBauen, 2014. *Hunspach-bâtiment rénové étude WUFI -*.
- Soudani, L., 2016. *Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material* (These de doctorat). Lyon.
- Tardy, D., Genis, L., Paccoud, G., 2016. *Pisé vivant : bonnes pratiques et témoignages*. CAPEB EMCC, La défense Levallois-Perret.
- Taylor, P., Fuller, R.J., Luther, M.B., 2008. Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. *Energy and Buildings* 40, 793–800. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.05.013>
- TheShiftProject, 2021. *The carbon transition think tank*.
- Vincent, T., 2019. *Caractérisation d'éco-matériaux terre-chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement*. Université Bretagne Sud.
- Vu, CC., Weiss, J., Ple, O., Amtrano, D., Vandembroucq, D., 2017. Revisiting statistical size effects on compressive failure of heterogeneous materials, with a special focus on concrete. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 121, 47-70.