

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/304793124>

CONSTRUCTION TERRE L'ISOLATION DU PISÉ : PERTINENCE ET PRINCIPES

Poster · September 2015

DOI: 10.13140/RG.2.1.1238.1688

CITATIONS

0

READS

4,718

6 authors, including:



Jean-Claude Morel

Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

146 PUBLICATIONS 5,447 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Antonin Fabbri

Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

145 PUBLICATIONS 2,687 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Lucile Soudani

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

19 PUBLICATIONS 294 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Florian Champiré

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

13 PUBLICATIONS 253 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

L'ISOLATION DU PISÉ : PERTINENCE ET PRINCIPES

TEXTE : PHILIPPE HEITZ*, JEAN-CLAUDE MOREL**,
ANTONIN FABBRI**, LUCILE SOUDANI**, FLORIENT CHAMPIRÉ**
NICOLAS MEUNIER***

* journaliste

** LGCB-LTDS (ENTPE-CNRS)

*** entreprise de maçonnerie

PHOTOS Ph.Heitz sauf mention contraire

La réglementation thermique et la demande des habitants poussent à l'isolation du pisé. Mais une isolation inadaptée au bâti en terre crue peut entraîner la perte du confort hygrothermique qui a fait la réputation de ce matériau naturel, ainsi qu'un risque de pathologie humide. Les recherches scientifiques en cours à l'ENTPE sur le fonctionnement hygrothermique du pisé enrichissent le débat sur la pertinence de l'isolation du pisé, et permettent de proposer des principes de mise en oeuvre de solutions adaptées.

Ce document numérique est interactif : les liens dans le texte renvoient directement au glossaire en fin d'article ou aux documents téléchargeables.

Des qualités reconnues depuis des siècles

Le pisé est l'une des nombreuses techniques de construction en terre crue inventées par l'Homme depuis le néolithique. On le trouve sur tous les continents. Ses murs massifs sont édifiés par compactage de terre argileuse graveleuse et humide dans de solides coffrages (banches). D'une dizaine de centimètres d'épaisseur, les lits successifs de terre à pisé sont damés au fouloir (ou pisoir) manuel ou pneumatique. Le décoffrage dès le damage terminé découvre un mur épais d'une cinquantaine de centimètres, à l'aspect caractéristique avec ses lits empilés, ses couleurs chaleureuses et son toucher velouté malgré la dureté acquise dès le compactage. Le pisé est toujours bâti sur un soubassement en maçonnerie le protégeant du rejaillissement de la pluie et évaporant les remontées capillaires avant qu'elles ne l'atteignent. En France, la localisation des bâtiments en pisé est très liée aux terres alluviales ou morainiques du quart sud-est : Val de Saône, Bresse, Bugey, Dauphiné, Forez, Livradois, Couloir rhodanien, Basse Durance et Comtat Venaissin. On en trouve également en Auvergne, Champagne, Limousin, Bretagne et vallée de la

Garonne. 75% de l'habitat traditionnel de l'Isère est construit en pisé. A Lyon, de nombreuses habitations sont construites en pisé dans les quartiers de St-Just, Vaise, Tassin et la Croix-Rousse...C'est dire l'importance patrimoniale de la conservation du savoir-faire des maçons piseurs, et du développement de techniques et équipements compatibles avec les conditions de chantier actuelles.

Le pisé a un très bon bilan environnemental : mettant en œuvre la terre crue locale, ce matériau a une très faible énergie grise, nécessitant très peu d'énergie pour son extraction, son transport et sa mise en œuvre. En outre, la terre crue est un matériau totalement recyclable, y compris par une nouvelle construction en pisé : on ne parle pas de fin de vie pour la terre, mais de nouvelle vie après un premier usage.

Cependant l'humanité n'a pas adopté le pisé après analyse de son cycle de vie, mais quand le matériau était disponible sous les pieds, et parce que les habitations en pisé ont révélé un confort thermique et une qualité de l'air très appréciable par la stabilisation de l'ambiance intérieure. Le confort d'été du pisé est particulièrement sensible dans les pays chauds, où il apporte un rafraîchissement et une humidification de l'air du logement par évaporation de l'eau contenue dans ses pores. De plus, l'inertie importante de ses murs massifs et denses ralentit et déphase le transfert de la chaleur extérieure vers l'intérieur : la chaleur du jour réchauffe le logement à la nuit seulement. Dans les pays tempérés, le confort d'hiver des maisons en pisé vient de sa capacité à absorber l'excès de vapeur d'eau de l'air intérieur. La condensation de celle-ci dans le mur dégage de la chaleur et le réchauffe. Ainsi les maçonneries en pisé constituent-elles un système de régulation hygrothermique à cycles quotidien et saisonnier, accumulant ou dégageant chaleur et vapeur d'eau.



Habiter une maison neuve en pisé

Le pisé est un mode constructif millénaire et particulièrement attractif, et construire une maison neuve en pisé est toujours possible. Cyrille Lemaître et Karine Josse-Tonnellier ont tenu : après trois années de recherches pour trouver un terrain pour le projet d'éco-hameau qu'ils portaient avec leur association, celui-ci s'est concrétisé sur la commune de Saint-Antoine l'Abbaye, en Isère. A 400 m d'altitude, sur le versant Est du plateau de Chambaran, leur maison fait face au Vercors. Comme ses voisines, elle est largement vitrée au sud pour optimiser les apports solaires passifs. La construction associe des murs d'angle de quatre mètres de haut en pisé avec des murs en paille à ossature bois extérieure (technique [GREB](#)). Le pisé est présent sur

Les enjeux de la recherche sur le fonctionnement hygrothermique du pisé

La question de l'isolation du pisé se pose aujourd'hui pour un gain sur le confort d'hiver et sur la consommation énergétique du logement existant, et pour répondre aux exigences de la réglementation thermique en construction neuve. Car le matériau pisé est trop peu isolant pour répondre seul ne serait-ce qu'aux exigences minimales de la RT 2005 : la résistance thermique de 50 cm de pisé équivaut à celle de 3 cm de polystyrène. Mais l'isoler, c'est prendre le risque d'entraver les échanges de chaleur et de vapeur du mur en pisé, de se couper de sa capacité de régulation de ces échanges et d'enfermer l'humidité dans le mur.

En construction neuve, l'objectif sera plutôt de mettre le pisé au bon endroit sans devoir l'isoler, dans une réponse architecturale sur le fonctionnement global du bâtiment. L'enjeu de la recherche scientifique est dans ce cas d'apporter à la maîtrise d'œuvre les données de modélisation du comportement hygrothermique du pisé, afin de répondre à la réglementation, afin d'optimiser les performances thermiques globales de la construction, et de s'assurer que les éventuelles solutions d'isolation n'entraînent ni pathologie humide du pisé, ni perte du confort d'été et des apports solaires l'hiver.

Pour la rénovation de l'existant, toujours dans une réflexion sur la globalité du bâtiment, l'objectif sera d'étudier la nécessité d'isolation d'un mur en fonction du niveau de confort demandé pour chaque pièce par les occupants, avec des solutions n'entraînant pas d'humidification excessive du pisé.

L'enjeu de la recherche scientifique est dans ce cas d'apporter au maître d'ouvrage et au maître d'œuvre la caractérisation des phénomènes de circulation de chaleur, de vapeur et d'eau au sein d'un mur en pisé, comme aide à la décision pour le choix d'une éventuelle solution d'isolation.

Enfin, la recherche devrait permettre de fonder la réglementation thermique applicable au pisé sur des critères plus proches de la réalité quant à la contribution au confort thermique des logements de ce matériau naturel, au bilan environnemental remarquable.



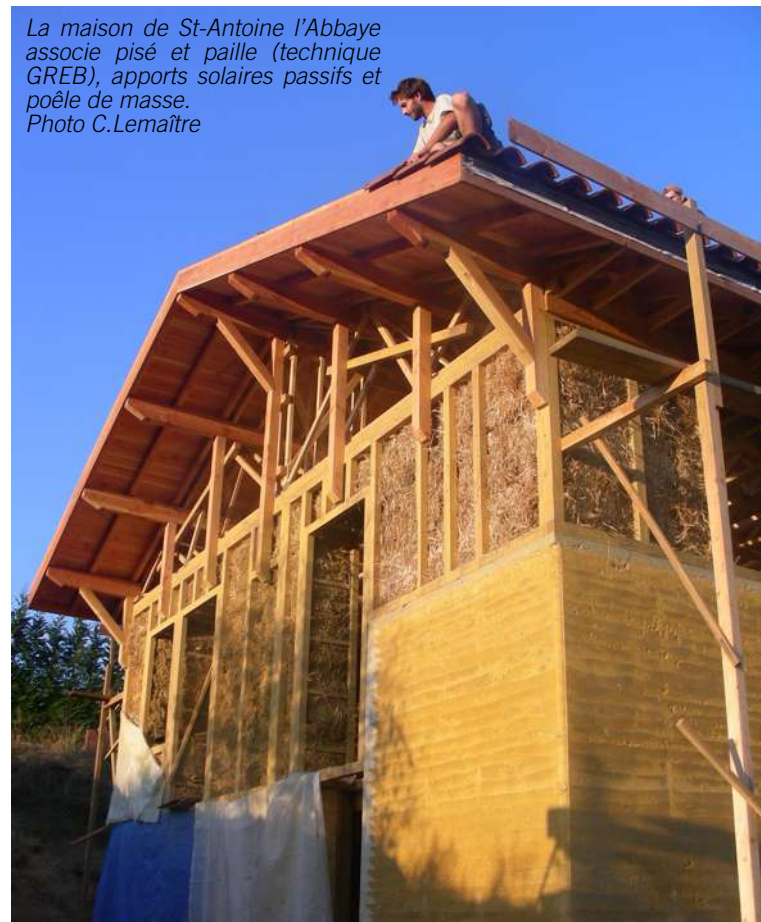
St-Antoine l'Abbaye (Isère) : construction des murs en pisé par Nicolas Meunier. La terre crue est damée au fouloir pneumatique dans de solides coffrages métalliques. Photo C.Lemaître

le pignon est, la façade sud et sur la moitié sud du pignon ouest, c'est-à-dire là où il bénéficie des apports solaires compte tenu de la pente du terrain. Façade nord et angle nord-ouest sont intégralement en paille. Pour compléter les apports solaires passifs, un poêle de masse.

Le pisé est l'oeuvre de l'artisan Nicolas Meunier. Cyrille Lemaître tire un bilan très favorable du choix du pisé : *"A notre emménagement en fin d'hiver 2013, la maison était encore très humide à cause du manque de séchage des enduits terre, de la terre-paille. Mais depuis, la gestion de l'humidité par le pisé est très bien, nous n'avons aucun souci l'hiver, en vivant à cinq dans la maison. Le jour, les apports solaires par les baies vitrées nous chauffent rapidement, et la nuit, l'inertie géniale du pisé fait qu'on ne s'aperçoit pas qu'il gèle dehors ! Cet hiver 2014/2015, nous n'avons consommé que deux stères de bois. J'ai aussi remarqué que le pisé absorbe les odeurs, même en l'absence de VMC dans la maison. Et le confort d'été est assez fantastique, il fait frais, on est bien sans artifice. Si c'était à refaire, je recommencerais !"*

Ces retours d'expériences, bien que très précieux, restent cependant trop subjectifs pour apporter la preuve des bienfaits des murs en pisé sur le comportement thermique et sur la qualité de l'air intérieur d'une habitation. Ainsi, lors du chantier de pisage, l'équipe du Laboratoire de Génie Civil et Bâtiment(LGCB-LTDS) de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE-CNRS) a instrumenté les murs d'angle sud et ouest, et installé une centrale d'acquisition qui enregistre en permanence depuis l'été 2011 les données hygrothermiques (température et humidité relative) du mur et de l'environnement. Des capteurs autonomes mesurent en plus les ambiances des pièces du logement. Le suivi se poursuit encore en 2015.

La maison de St-Antoine l'Abbaye associe pisé et paille (technique GREB), apports solaires passifs et poêle de masse. Photo C.Lemaître



Le pisé, un matériau dense, granulaire et poreux

Une compréhension fine du comportement du pisé passe forcément par une bonne connaissance de sa composition et des interactions mécaniques, physiques et chimiques se produisant en son sein. La terre à pisé est composée d'argiles (grains au-dessous de 2 μm), de limons (ou silts, entre 2 μm et 60 μm), de sables (entre 60 μm et 2 mm), et parfois de graviers (entre 2 mm et 2 cm) et de cailloux (entre 2 cm et 10 cm). Les proportions entre ces composants de la terre à pisé sont très variables naturellement et la granulométrie des pisés existants reflète cette diversité: on bâtissait avec la terre locale, en évitant au maximum le transport de ce matériau pondéreux. La microscopie électronique à balayage montre des ponts d'argile liant les grains de sable d'un échantillon de pisé. Les argiles sont des phyllosilicates à la structure moléculaire feuilletée : des plans d'anions d'oxygène (O^{2-} ou OH^-) emprisonnent des cations de silicium, d'aluminium et de magnésium et s'empilent en feuillets élémentaires nanométriques. Ceux-ci s'agrègent couramment en plaquettes, forme géométrique à très grande surface par rapport à son volume. Ces plaquettes d'argile se collent entre elles par la force capillaire due à la tension superficielle des ménisques formés par l'air et le film de quelques nanomètres d'eau qui les entoure. Beaucoup de surface de contact pour une faible masse : la force capillaire de cohésion est multipliée.

A l'échelle moléculaire (nanométrique), les feuillets élémentaires des argiles sont aussi liés par les forces de Van der Waals. Néanmoins, pour la cohésion du matériau, ces forces ont un rôle négligeable par rapport aux forces capillaires (H.Van Damme, D.Gélar 2005).

Les forces électrostatiques dues aux charges électriques des ions constitutifs des feuillets d'argiles et des ions mobiles qui les entourent ont un rôle essentiel dans les différences de propriétés entre les familles d'argiles. Par exemple, au contraire des kaolinites dont les feuillets sont électriquement neutres, les smectites et les illites ont des feuillets chargés négativement, qui attirent dans l'eau qui les entoure des ions positifs, eux-mêmes attirés par la surface des grains de sable. Résultat : ces argiles sont plus "collantes" que les kaolinites. Une charge plus élevée des cations (Ca^{2+} au lieu de Na^+) renforce l'attraction électrostatique. Ainsi, la cohésion électrostatique d'une smectite calcique peut être dix fois supérieure à sa cohésion par capillarité (H.Van Damme).

A l'échelle des grains micrométriques, ce sont les forces de friction et capillaires qui sont prépondérantes. Les forces de frottement entre les granulats sont augmentées par la diversité des granulométries. Au final, le pisé est un béton



d'argile qui peut défier les siècles, à la condition d'être bien protégé d'une humidification excessive. Le pisé n'est jamais vraiment sec, et la quantité d'eau contenue dans le matériau varie en fonction de l'humidité relative de l'air et, dans une moindre mesure, de la température. Cette capacité à capter et à relarguer les molécules d'eau liquide est quantifiée par les [isothermes de sorption/désorption](#), dont la pente moyenne ξ est communément appelée la capacité hygroscopique.

Les granulats de tailles complémentaires forment le squelette et participent à la résistance à la compression et à la fissuration. L'argile et l'eau, à l'instar d'une colle, donnent la cohésion à ce béton naturel. 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 communicant entre eux forment un réseau, voie de circulation des fluides gazeux (air, vapeur) ou liquide (eau). Les chercheurs du Laboratoire de Génie Civil et Bâtiment (LGCB-LTDS) de l'ENTPE ont quantifié le flux de vapeur d'eau traversant divers échantillons de pisé. Cela donne des valeurs de [coefficient \$\mu\$](#) de résistance à la diffusion de vapeur d'eau entre 9 et 10,6 : le pisé est beaucoup moins résistant au passage de la vapeur d'eau que le béton armé ($\mu=105$) (valeur logiciel COCON). Les valeurs de μ du pisé sont comparables à celles du bloc béton et de la brique pleine cuite ($\mu=10$) (valeur logiciel COCON).



Échantillons de pisé et solution saline saturée pour mesure de flux de vapeur au LGCB.

Dans sa thèse soutenue en 2014, Pierre-Antoine Chabriac rapporte les valeurs de [porosité](#) moyenne du pisé neuf de la maison de St-Antoine l'Abbaye ($\eta=0,345$) et de deux pisés de cent ans ou plus (Montseveroux $\eta=0,39$ et Lyon $\eta=0,387$), valeurs dans la moyenne des valeurs courantes de la littérature scientifique.

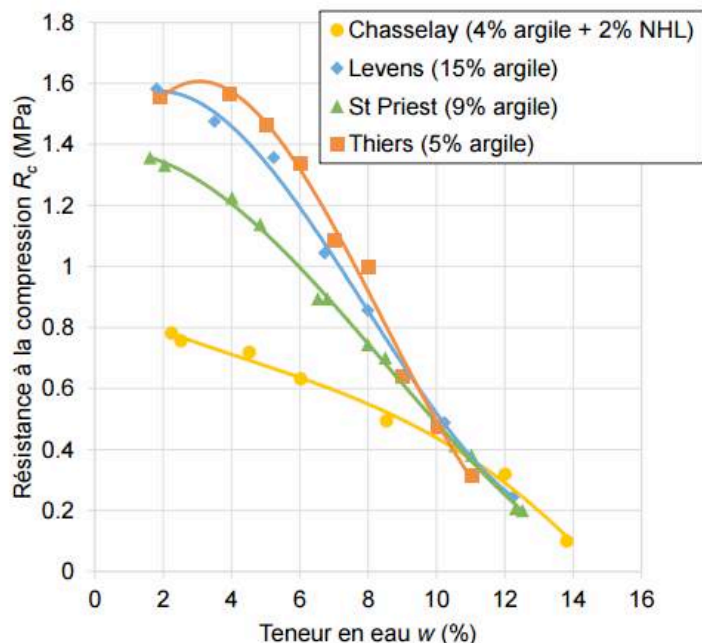
Les mêmes échantillons ont des densités de 1,73 (St-Antoine) et 1,62 pour les pisés anciens. Le passage dans les années 1980 du fouloir manuel au fouloir pneumatique, et aux coffrages métalliques, a conduit souvent à des

densités plus élevées : entre 1,7 et 1,9 t/m³. Mais la composition de la terre a plus d'influence sur la densité du pisé que la puissance du damage.

L'eau au sein du matériau, pour le meilleur et pour le pire

On l'a compris, la présence simultanée d'eau liquide et d'air dans les pores du pisé est une condition pour créer la force capillaire. La quantité d'eau nécessaire est très faible : la résistance à la compression R_c d'un échantillon de terre à pisé compactée ne diminue que pour une déshydratation complète à l'étuve à 200°C (CRATERRE-ENSAG). En conditions réelles, il y a toujours suffisamment d'eau dans le pisé..

A l'inverse, l'humidification des pisés au-delà de 0,5 à 3% de teneur en eau diminue leur résistance à la compression. Des essais menés au LGCB sur des échantillons de pisé contenant entre 4 et 15% d'argile, stabilisé ou non à la chaux NHL, mesurent une décroissance de R_c de 2 Mpa à 0,2 Mpa en passant de 2% de teneur en eau à 12,5%. La perte de résistance est variable selon les pisés étudiés, mais tous montrent qu'à 5% de teneur en eau, elle est entamée. Le laboratoire a trouvé en 2012 une teneur en eau de 11 à 13% dans des échantillons de pisé prélevés suite à un effondrement d'une façade complète de maison à Lyon : l'humidification excessive du pisé entraîne des risques majeurs. En effet, le noyage par l'eau liquide des pores de la terre en chasse l'air et supprime la tension superficielle entre les phases liquide et gazeuse : la force de cohésion capillaire disparaît, 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. La



La résistance à la compression du pisé diminue avec une teneur en eau croissante (à partir de 2% pour ces échantillons). LGCB

teneur en eau d'un pisé sain, en équilibre avec l'atmosphère du logement, est d'environ 1 à 3%, une fois passée la période de séchage après sa mise en œuvre. En s'humidifiant, le pisé prend une couleur foncée à partir de 5 à 7% : il reste dur mais la pathologie est déjà là. Encore plus dégradé, il garde l'empreinte du doigt et se déforme comme une pâte à modeler.



Sous un enduit ciment, le pisé à l'état pathologique plastifié garde l'empreinte du doigt.

A la mise en œuvre, la teneur en eau de la terre à pisé est de 10 à 20 %. A St-Antoine l'Abbaye, l'artisan piseur Nicolas Meunier a pallié la forte teneur en eau de fabrication de 18-20 % (en masse) par un ajout de 2,5 % (en masse) de chaux NHL5. La construction des murs s'est faite en juin-juillet 2011. Les capteurs installés dans les murs montrent qu'il faut attendre un an pour que la teneur en eau mesurée au cœur des murs sud et ouest descende entre 4 et 5 %, et ce en l'absence de chauffage, car la maison en grande partie autoconstruite n'a été habitée qu'en mars 2013.

La pathologie humide du pisé a de multiples origines (1), conduisant le plus souvent à humidifier excessivement la base du mur, au contact avec son traditionnel soubassement en maçonnerie de pierres, galets ou briques, liés à la chaux. Celui-ci met le pisé hors de portée du rejaillissement de l'eau de pluie frappant le sol. Le soubassement est bien souvent également un matériau poreux. Cependant, le débit de remontée capillaire au sein de son réseau poreux est suffisamment faible pour que le surplus d'eau puisse être évacué par évaporation avant qu'il n'atteigne le mur en terre. Sauf si une élévation du niveau du sol réduit sa hauteur exposée à l'air, sauf si un enduit ciment imperméabilise sa surface... Dans une construction moderne, une coupure capillaire entre le soubassement et le pisé résout le problème des remontées capillaires. L'humidification excessive du pisé peut également arriver si la vapeur d'eau du logement ne peut s'évacuer du mur et condense à l'intérieur, à cause d'une couche peu ou pas perméante à la vapeur (enduit ciment, isolant, doublage non-ventilé ...). Isoler par l'intérieur conduit à couper le mur de la chaleur du logement, donc, le refroidissant, à favoriser la condensation de la vapeur atteignant le point de

Humidification pathologique d'un mur d'étable par accumulation de salpêtre dans la terre du mur, malgré un important soubassement de maçonnerie de pierre.



rosée à l'intérieur du mur (ce phénomène n'est pas propre au pisé et se produit aussi par exemple dans une couche isolante sans pare-vapeur). Le pisé est l'enveloppe perspirante de la maison, le risque en l'isolant mal est de lui ajouter un ciré au lieu d'un pull.

La question de l'isolation du pisé implique donc une attention particulière sur la préservation du fonctionnement hygrothermique du mur.

[\(1\) télécharger l'article "la pathologie humide du pisé", revue Qualité Construction N°143 publiée par l'AQC en 2014](#)

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

L'équipe du LGCB conduit depuis 2013 dans le cadre du projet Primaterre des recherches sur le comportement hygrothermique du pisé, à trois échelles : sur des échantillons décimétriques en laboratoire, sur quatre maquettes métriques de mur en caissons étanches en laboratoire, et sur la maison instrumentée de St-Antoine l'Abbaye. Les premiers résultats permettent de caractériser les transferts de chaleur, de vapeur et d'eau au sein du pisé, matériau poreux.

LE PROJET PRIMATERRE

Les recherches menées à l'ENTPE sont le fruit d'une coopération ancienne avec les artisans, maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrage, réunis dans les associations nationale (Ecobâtir) ou régionale (TERA). Ces recherches sont aussi soutenues par la région Rhône-Alpes et par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) dans le cadre du projet PRIMATERRE « Rénover et bâtir durable avec les matériaux premiers (maçonneries de terre crue et pierre) », dans lequel la terre est vue comme un matériau multiphysique. Ce dernier projet mobilise trois laboratoires de recherches et deux entreprises (Filiaterre et Nicolas Meunier). Les trois laboratoires sont tous sous tutelle du CNRS et aussi sous tutelle de l'Université de Savoie pour le LOCIE, de l'Ecole Centrale de Lyon et de l'ENTPE pour le LTDS, et enfin de l'ENTPE pour RIVES-EVS. Le coordonnateur est Jean-Claude Morel du LTDS (tutelle ENTPE). L'équipe ENTPE qui travaille sur ce sujet, outre les auteurs, est composée de : Joachim Blanc-Gonnet, Stéphane Cointet, Fionn McGregor, Stéphane Hans, Ali Mesbah et Henry Wong.

L'eau présente dans le mur en phase liquide est exprimée en teneur en eau massique (kg/kg) ou volumique (m^3/m^3). La vapeur d'eau est exprimée en humidité relative, rapport entre la pression de vapeur présente dans l'air des pores et la pression de vapeur saturante à la même température (en %).

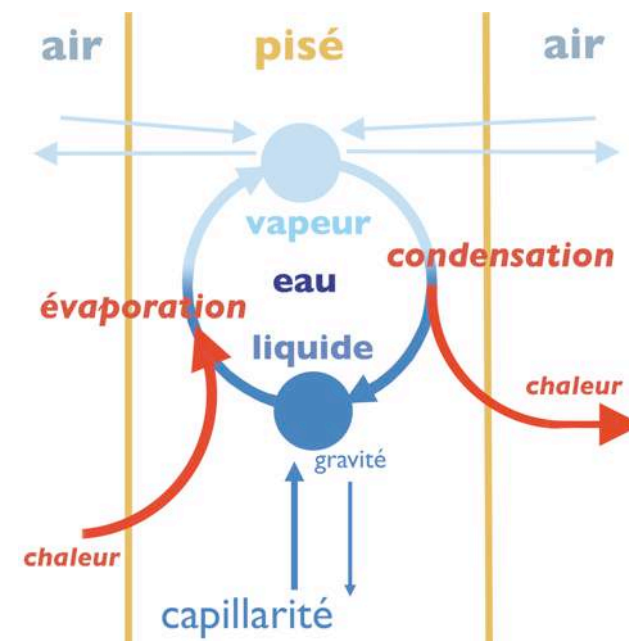
L'instrumentation des murs a été réalisée à différentes épaisseurs et à différentes hauteurs en phase de réalisation par des capteurs renforcés afin de supporter la pression lors du damage.

Un des premiers résultats marquant obtenu lors de cette étude est la preuve d'une forte hétérogénéité spatiale de la teneur en eau des murs. En effet, en raison de la gravité, l'eau descend dans le mur après la fabrication de celui-ci, période où sa teneur en eau est la plus importante (hors hydratation pathologique). Dans une maquette de mur de 1 m de haut, 1,5 m de long et 30 cm d'épaisseur, avec une teneur en eau massique élevée de 18 % à la mise en oeuvre, les teneurs en eau mesurées par deux capteurs placés à 90 cm et 10 cm de hauteur étaient, au 60e jour après la fabrication, à 16% en haut et à 19% en bas. Une valeur identique de 9% est atteinte au bout de 4 mois, et le séchage se poursuit alors de manière homogène jusqu'à la valeur de 4% mesurée au bout d'un an. Ces mesures en laboratoire comme sur la maison instrumentée montrent que la cinétique de séchage des murs en pisé se compte en années, et que la gravité influence le déplacement de l'eau pendant les premiers jours. Ensuite, la force de succion capillaire devient dominante : l'eau ne descend plus par gravité.

Le second 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.

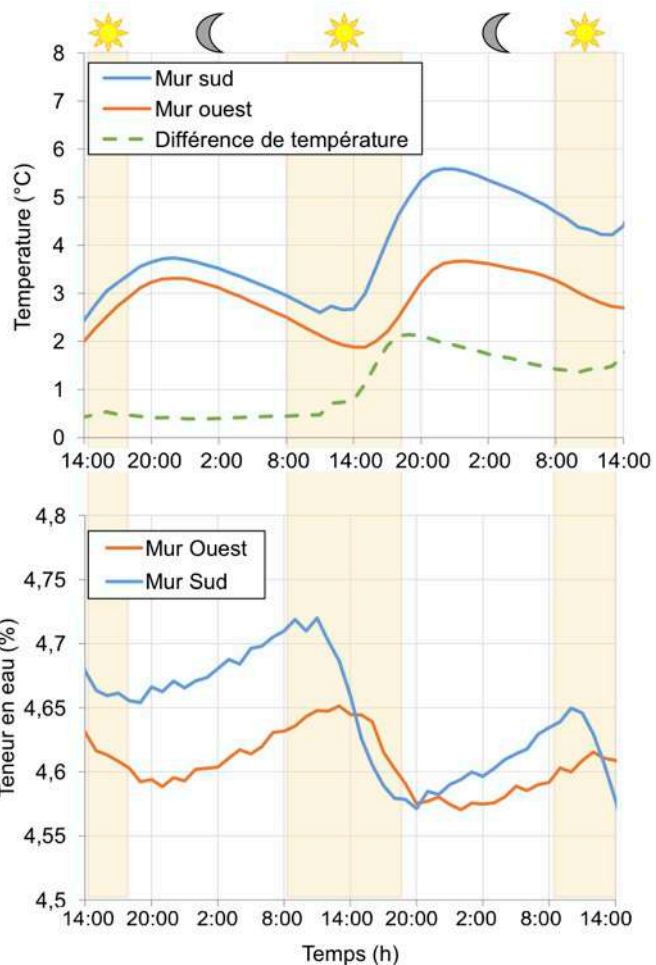
La condensation dégage de la chaleur (chaleur latente). S'il fait chaud, l'air extérieur chaud et sec rentre dans le mur, le traverse et évapore petit à petit l'eau stockée dans les pores. L'évaporation consomme de la chaleur (chaleur latente). L'air arrive au logement rafraîchi et humidifié.



Les circulations de chaleur, d'eau et de vapeur dans le pisé sont liées : les transferts sont dits couplés dans un fonctionnement global dit hygrothermique.

Schéma Ph.Heitz

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. Par exemple, on constate sur 48h, sur les deux murs sud et ouest, deux oscillations inversées de température et de teneur en eau : quand la température des murs monte, leur teneur en eau descend, et inversement. Une journée d'hiver ensoleillée creuse un écart de 2 °C entre orientations sud et ouest, avec une variation de teneur en eau plus importante au sud. Par exemple, pour le mur sud oscillant entre 2,5°C et 5,5°C, sa teneur en eau varie inversement de 4,7% à 4,5%.



Maison de St-Antoine l'Abbaye : courbes sur 48h de température et teneur en eau au milieu des murs sud et ouest.

Graphiques LGCB

Les courbes bleues révèlent la consommation et la production de chaleur latente d'évaporation et de condensation au cœur du mur Sud, pour deux jours d'hiver avec la maison inhabitée. Dans cet exemple, le graphique du bas de la teneur en eau montre que l'évaporation démarre à 11h alors que le réchauffement (graphique du haut) ne commence qu'à 14h : l'évaporation a consommé tout l'apport solaire pendant 3 heures. La condensation reprend à 20h, et le refroidissement ne démarre que vers 22h : la condensation a prolongé le réchauffement du mur de 2 heures en début de nuit.

Les courbes bleues révèlent la consommation et la production de chaleur latente d'évaporation et de condensation au cœur du mur Sud, pour deux jours d'hiver avec la maison inhabitée. Dans cet exemple, le graphique du bas de la teneur en eau montre que l'évaporation démarre à 11h alors que le réchauffement (graphique du haut) ne commence qu'à 14h : l'évaporation a consommé tout l'apport solaire pendant 3 heures. La condensation reprend à 20h, et le refroidissement ne démarre que vers 22h : la condensation a prolongé le réchauffement du mur de 2 heures en début de nuit.



St-Antoine l'Abbaye (Isère). L'équipe du LGCB relève les données de la centrale d'acquisition des mesures des murs en pisé.

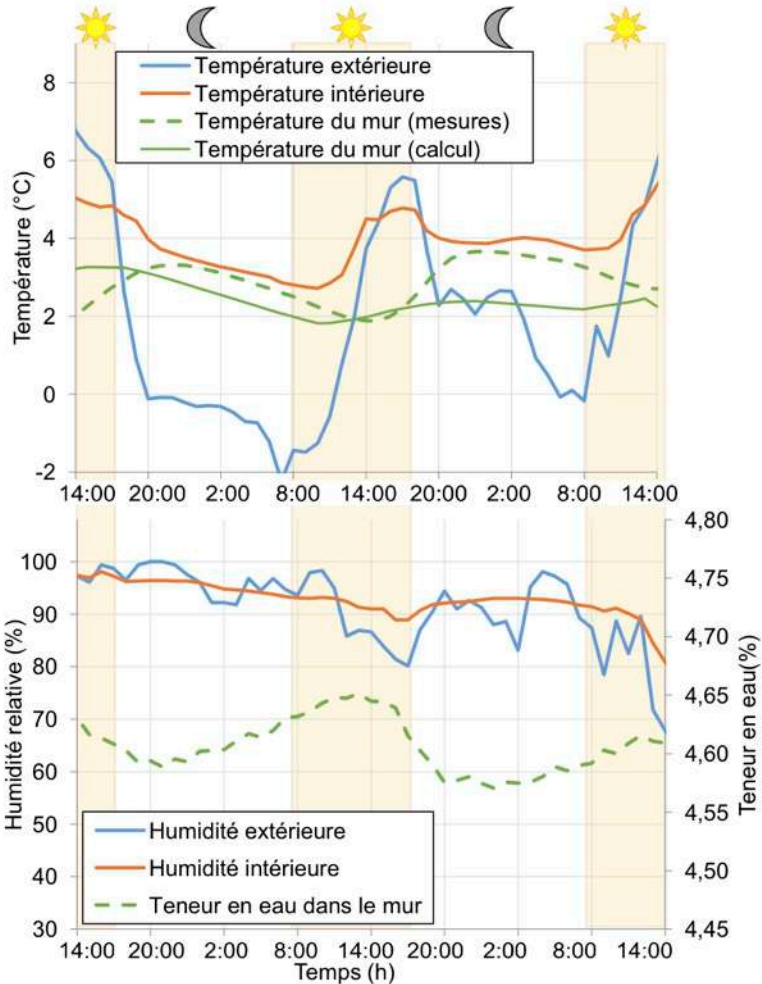


Maison de St-Antoine l'Abbaye : les sondes d'humidité relative et température (à gauche) et de teneur en eau (à droite) positionnées dans les murs en pisé.

Photos LGCB

A quel rythme cela fonctionne-t'il ?

Le déphasage entre le pic de température extérieure et le pic de température du mur a été mesuré : 6 heures pour un mur de 50 cm. Le graphique ci-dessous 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 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



Maison de St-Antoine l'Abbaye : courbes sur 48h de température et teneur en eau au milieu du mur sud, et de température et humidité à l'intérieur ou à l'extérieur de la maison.

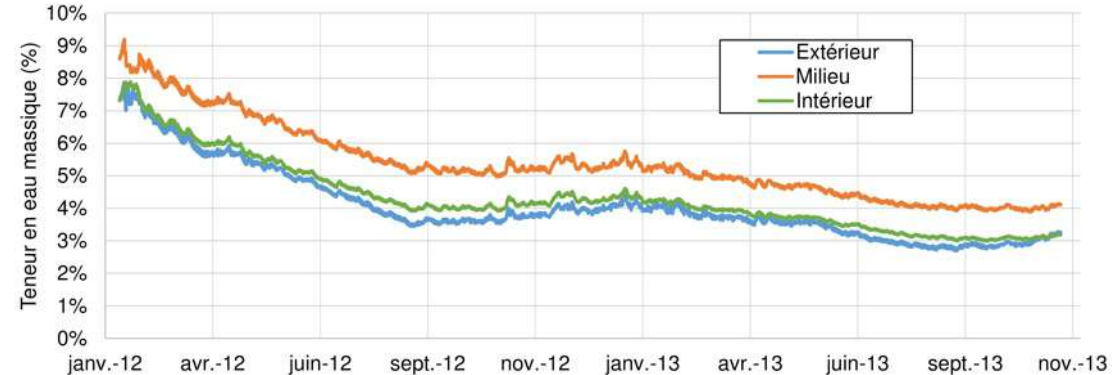
Graphiques LGCB

les changements de phases de l'eau, par le phénomène de chaleur latente, viennent contribuer à augmenter l'inertie thermique apparente des murs.

Le lissage de l'humidité relative de l'air de la maison est mesurable : celle de l'air extérieur fluctue beaucoup plus vite, tour à tour plus haute ou plus basse que celle de l'air intérieur. (2)

A ce rythme quotidien pourrait s'ajouter un rythme saisonnier.

La maison étant neuve et partant donc d'un état hydrique non stabilisé, les enregistrements de teneur en eau des murs sud et ouest pour la première année de la maison de St-Antoine montrent que c'est avant tout le phénomène de séchage du



Maison de St-Antoine l'Abbaye : courbes sur 9 trimestres de teneur en eau massique au milieu et à 10 cm des surfaces intérieure et extérieure du mur sud. Graphique LGCB

mur qui domine : décroissance régulière de la teneur massique en eau, passant au coeur du mur sud de 9% en janvier 2012 à 5% en fin d'été. Avec la chute des températures à l'automne, la teneur en eau remonte à 5,5% en janvier 2013. Le démarrage du chauffage de la maison (poêle de masse) en mars 2013, conjugué à la remontée printanière des températures extérieures, entame un nouveau cycle annuel séchage-humidification, avec des valeurs entre 5,5% et 4%. A noter que les sondes placées à 10 cm des surfaces extérieure et intérieure des murs donnent des valeurs de teneur en eau massique inférieures de 1 à 1,5% aux valeurs mesurées au milieu du mur de 50 cm d'épaisseur, et évoluent en parallèle. Le coeur du mur est toujours le plus humide.

(2) [télécharger la thèse de P.A.Chabriac "Mesure du comportement hygrothermique du pisé"-2014-ENTPE-0007](#)

La modélisation du comportement hygrothermique du pisé

Au-delà de l'étude thermique réglementaire pour les constructions nouvelles, les simulations thermiques dynamiques visent à anticiper le comportement thermique du logement au fil des saisons, en fonction du système constructif, des équipements, des occupants. Les logiciels de simulation actuels s'appuient-ils sur des modélisations mathématiques adaptées au matériau pisé ?

Il existe des modélisations du comportement hygrothermique des matériaux de construction : diagramme de Glaser, modèle Wufi par exemple. Or l'équipe du LGCB

a constaté un écart entre les mesures effectuées sur les maquettes avec les résultats obtenus par le calcul prévisionnel avec un modèle de type Wufi. Sur les mesures, on constate un écart pour la remontée en température au coeur du mur-maquette de 30 cm : celle-ci se produit en réalité 4 heures plus tard que prévu par le calcul. De plus, le modèle simplifié sous-estime de 2°C cette remontée en température.

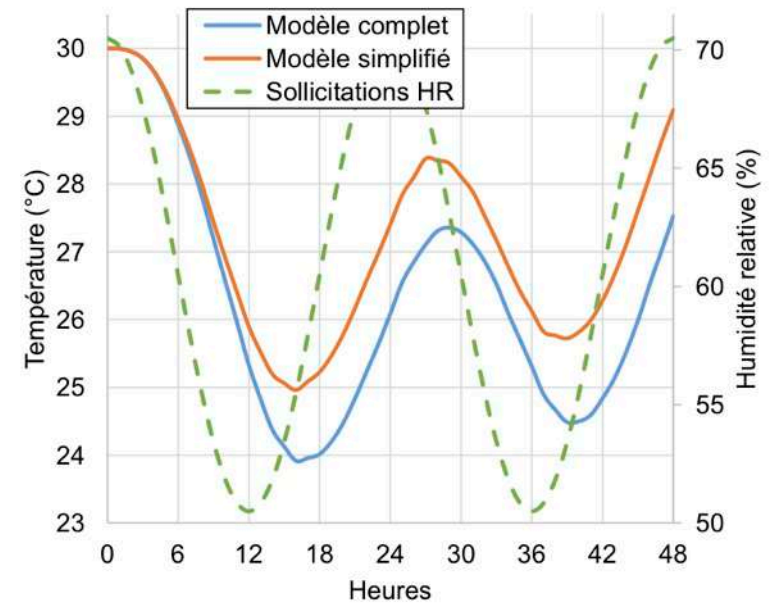
Lucile Soudani, doctorante au LGCB, a cherché à développer une modélisation plus complète des transferts. Elle a proposé une nouvelle formulation mathématique capable de simuler les transports de chaleur et de masse (eau et vapeur), tenant compte des changements de phase de l'eau à l'intérieur des murs de terre, caractérisés par leur forte microporosité et leur importante capacité de rétention d'eau. Par des comparaisons entre les mesures de température des murs d'essai en enceintes contrôlées et les résultats prévus par le modèle complet proposé, elle a démontré que la réintroduction dans le code de calcul hygrothermique des termes d'équations couramment négligés induisait des modifications significatives dans les cas où les paramètres matériau du pisé sont utilisés. Par exemple, l'une des hypothèses étudiées est que l'impact du gradient thermique sur le transport d'eau liquide à humidité relative constante ne peut être négligé dans le cas de ce matériau multiphysique. Validée par l'expérimentation, la démonstration mathématique faite que le gradient de chaleur est un des moteurs des transferts de vapeur et d'eau dans le pisé. La prise en compte de ce facteur dans les logiciels de modélisation du comportement hygrothermique des matériaux poreux semble nécessaire pour le matériau terre. Les chercheurs soulignent que ce résultat est issu uniquement de mesures sur les maquettes en laboratoire constituées de la terre de la maison de St-Antoine.

Leurs recherches ont également permis de quantifier l'impact sur le résultat des modèles existants de l'hypothèse simplificatrice négligeant ce gradient thermique. La comparaison entre le modèle complet LGCB et un modèle simplifié classique a porté sur deux simulations de température d'un mur selon deux scénarios : épisode pluvieux chaud (hypothèse de variation cyclique d'humidité relative de l'air de 50% à 70%, à température constante de 30°C) et épisode de froid sec (cycle quotidien de réchauffement-refroidissement entre 0°C et 20°C à humidité relative de l'air constante de 60%).

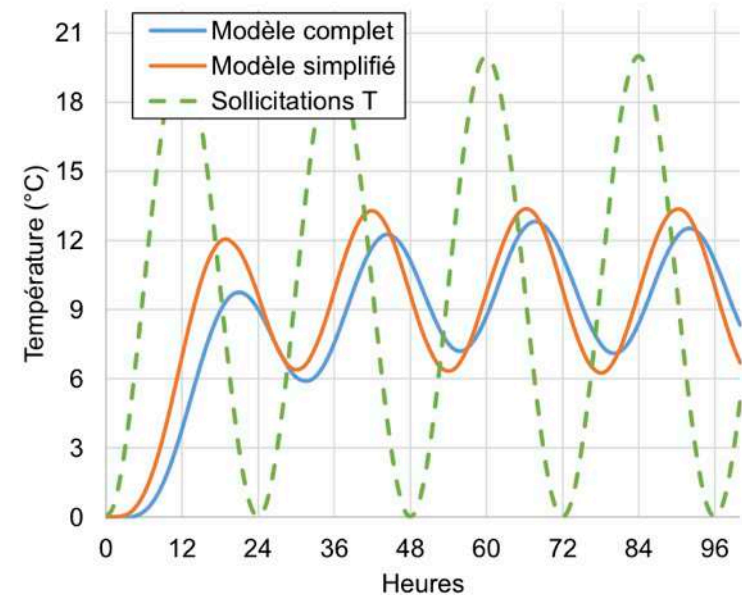
Dans le premier scénario, les deux modélisations montrent une baisse de la température du mur qui suit, avec un déphasage, la chute de l'humidité de l'air extérieur (modélisation de l'évaporation dans le pisé); température qui remonte avec la remontée de l'humidité extérieure (modélisation de la condensation dans le pisé). Mais le modèle simplifié réduit de 1°C l'amplitude de variation de température du mur (6°C d'amplitude pour le modèle LGCB).

Dans le second scénario, les deux modèles montrent une oscillation de la température du mur qui suit, avec un déphasage, l'oscillation de la température de l'air extérieur. Mais, là encore, le modèle simplifié sous-estime à la fois l'amplitude de la variation (-1,4°C sur 5°C) et du déphasage (7h au lieu de 10h).

Au final, le modèle complet proposé simule plus exactement le comportement hygrothermique du pisé que les modèles simplifiés courants, qui sous-estiment l'inertie thermique du pisé et son potentiel d'amortissement des variations de températures et d'humidité relative de l'air. (3)



Comparaison entre les courbes de température en milieu de mur obtenues selon les modèles en réponse à une variation d'humidité relative de l'air à température constante. Graphique LGCB



Comparaison entre les courbes d'humidité relative en milieu de mur obtenues selon les modèles en réponse à une variation de température de l'air à humidité relative constante. Graphique LGCB



Photo Nicolas Meunier

Les pisés en chiffres

Oui, les pisés, et non le pisé. Le terme générique au singulier qualifie en effet mieux le produit d'une technique qu'un matériau bien caractérisé, tant la composition des terres crues à bancher varie. Matériau d'extraction naturel, la terre à pisé reflète la variété des sols en termes de granulométrie et de nature d'argiles. Le piseur peut aussi la tamiser, lui ajouter de la chaux. Le passage du fouloir manuel en banches de bois au fouloir pneumatique en coffrages métalliques conduit en général à une densification du pisé. Les caractéristiques des pisés sont donc variables dans des fourchettes de valeurs recensées au LGCB.

paramètre	symbole	unité	valeurs (sources)
densité sèche	d	t/m ³	1,5 à 1,8, en moyenne 1,73 (St Antoine - LGCB 2014) 1.9 (Allinson, Hall 2010)
porosité	η	-	0,33 à 0,44, en moyenne 0,36 (St Antoine - LGCB 2014) 0,29 (Allinson, Hall 2010)
valeur de bleu	VBS	-	0,52 (St-Antoine- LGCB 2014)
conductivité thermique	λ	W/m.°K	0,64 à 0,9 (St Antoine - LGCB 2014) 0,4 à 0,5 (CSTB 2011) 0,64 (Allison, Hall 2010)
capacité calorifique massique	Cp	J/kg.°K	647 (St Antoine - LGCB 2014) 868 (Allison, Hall 2010)
absorptivité lumineuse (coefficient d'absorption solaire)	A	-	0,71 à 0,80 (LGCB 2014) 0,55 (St- Antoine - LGCB 2014)
coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	μ	-	9 à 10,6 (St- Antoine - LGCB 2014) 9 à 11 (CSTB 2011)

Quatre maquettes de mur en pisé construites par l'entreprise Nicolas Meunier ont été instrumentées et placées en enceinte isotherme au Laboratoire Génie Civil et Bâtiment à l'ENTPE.

De longueur 1,5 m et hauteur 1 m, deux murs sont épais de 0,5 m (dimensions courantes en Rhône-Alpes) ; les deux autres sont épais de 0,3 m pour obtenir des transferts de chaleur et humidité plus rapides au travers du mur, tout en restant dans des dimensions courantes dans les pays anglo-saxons sur du pisé stabilisé.



Jean-Claude Morel, coordinateur du programme Primaterre, fait le point. "Nous terminons la première étape : avoir une connaissance très pointue du fonctionnement du matériau pisé. Mais avant

d'arriver à intégrer notre modèle complet dans un logiciel de calcul à l'échelle du bâtiment comme Wufi, nous devons faire un travail de paramétrage des données d'entrée, d'explicitation du modèle, pour qu'il puisse être pratique à utiliser. Quels paramètres l'utilisateur devra-t-il mesurer ? Par quel moyen pratique ? Bref, nous devons travailler l'ergonomie du modèle."

(3) [télécharger l'article de L.Soudani "Étude de la pertinence des hypothèses dans la modélisation hygrothermique du pisé"](#) - conférence IBPSA Arras - 2014



Conductivité thermique, résistance et transmission thermique, capacité calorifique

Le comportement thermique d'un matériau se caractérise principalement par sa conductivité thermique λ (lambda), qui est sa capacité à transmettre la chaleur, et sa capacité calorifique, qui est sa capacité à emmagasiner de la chaleur.

La littérature scientifique montre que le coefficient de conductivité thermique λ de la terre sèche augmente globalement avec la densité. Mais l'étendue de la fourchette de valeurs calculées pour le lambda montre qu'il est impossible de déterminer une valeur unique, même en fonction de la densité (valeurs comprises entre 0,25 et 1,3 W/m.°K pour des densités variant entre 1,4 et 1,9 t/m³).

Pierre-Antoine Chabriac a mesuré en laboratoire la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau volumique d'échantillons des pisés précités de St-Antoine, Montseveroux et Lyon. Les trois montrent une diminution linéaire de λ avec le séchage : de 2,1 W/m.°K à 28% de teneur en eau volumique à 0,64 W/m.°K après séchage complet à 60°C. Le pisé sec est plus isolant qu'un pisé humide : le transfert de chaleur par conduction par l'eau contenue dans les pores est efficace.

En France, après séchage initial, une maison habitée en pisé sain voit sa teneur en eau massique varier entre 0,5 et 3% , soit 0,9 à 5,2% en teneur en eau volumique pour St-Antoine. Pour cet exemple, la conductivité thermique λ passera de 0,64 à 0,9 W/m.°K, soit une variation de près de 30%.

Le coefficient λ caractérise le matériau, et la paroi d'épaisseur e est caractérisée par son coefficient R (m².°K/W) de résistance thermique : $R=e/\lambda$. On constate en comparant les R de quelques parois denses, avec indication de leur équivalent en épaisseur d'isolant léger ($\lambda=0,04$ W/m.°K pour laine de verre, liège et ouate de cellulose), qu'un mur en pisé est plus isolant qu'un mur en pierre ou béton, mais qu'on ne peut le qualifier d'isolant.

matériau	λ (W/m.°K)	épaisseur mur (m)	R (m ² .°K/W)	épaisseur (cm) équivalente isolant à $\lambda=0,04$ (laine de verre, ouate, liège)
béton armé	1,3 - 2,1	0,20	0,09 - 0,15	0,6 - 0,4
granite	2,2	0,50	0,22	0,9
calcaire tendre	1,0 - 1,7	0,50	0,29 - 0,50	2 - 1
pisé	0,57 - 0,9	0,50	0,55 - 0,87	3,5 - 2

Différents auteurs ont publié des valeurs de capacité calorifique du pisé, donnant des valeurs un peu plus élevées que celle mesurée au LGCB sur le pisé de St-

Antoine. Les fourchettes de valeurs révèlent la variabilité du matériau naturel composite. Un auteur donne une proportionnalité directe entre la capacité de stockage de la chaleur du pisé et sa densité à l'état sec (Laurent 1986).

Isoler le pisé ?

La valeur relativement élevée de la conductivité thermique du pisé met en évidence l'apparente nécessité d'y ajouter un isolant. Cependant, un débat existe chez les professionnels du bâtiment sur la pertinence d'isoler le pisé, conscients qu'ils sont du risque de bloquer son fonctionnement hygrothermique, et du risque de pathologie humide.

Le retour d'expérience des habitants indique qu'ils apprécient l'inertie thermique, le lissage de l'hygrométrie ambiante et la captation des odeurs apportés par les parois lourdes en terre crue. Sans parler de leur esthétique. En revanche, ceux-ci notent un inconfort d'hiver seulement pour un mur en pisé exposé au nord : il est une surface froide émettant très peu d'infrarouges, d'où une sensation de "rayonnement froid", poussant à surchauffer l'air pour compenser cet inconfort. Sans apports solaires, avec un fonctionnement hygrothermique ralenti par le froid, le mur nord en pisé est plus un inconvénient qu'un avantage.

Les travaux du LGCB confirment l'efficacité hygrothermique des murs en pisé. 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, à la fois au jour le jour et sur l'année. A condition de préserver leur capacité à échanger la vapeur d'eau et la chaleur.

La question de l'isolation du pisé doit donc 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, comme par exemple dans le cas de la maison de St Antoine où les murs en pisé sont situés au Sud et le mur Nord est en paille avec un enduit en terre à l'intérieur (5). Les performances globales de la maison sont optimisées en s'assurant d'une bonne isolation des ouvertures, de la toiture ou des combles.

Maison de St-Antoine l'Abbaye : les apports solaires passifs sont optimisés par de larges ouvertures en façade sud, encadrées par des murs en pisé sans isolation.

Les murs de l'étage et la façade nord sont en ossature bois et isolation en bottes de paille (technique GREB), avec bardage extérieur et enduits terre intérieurs.

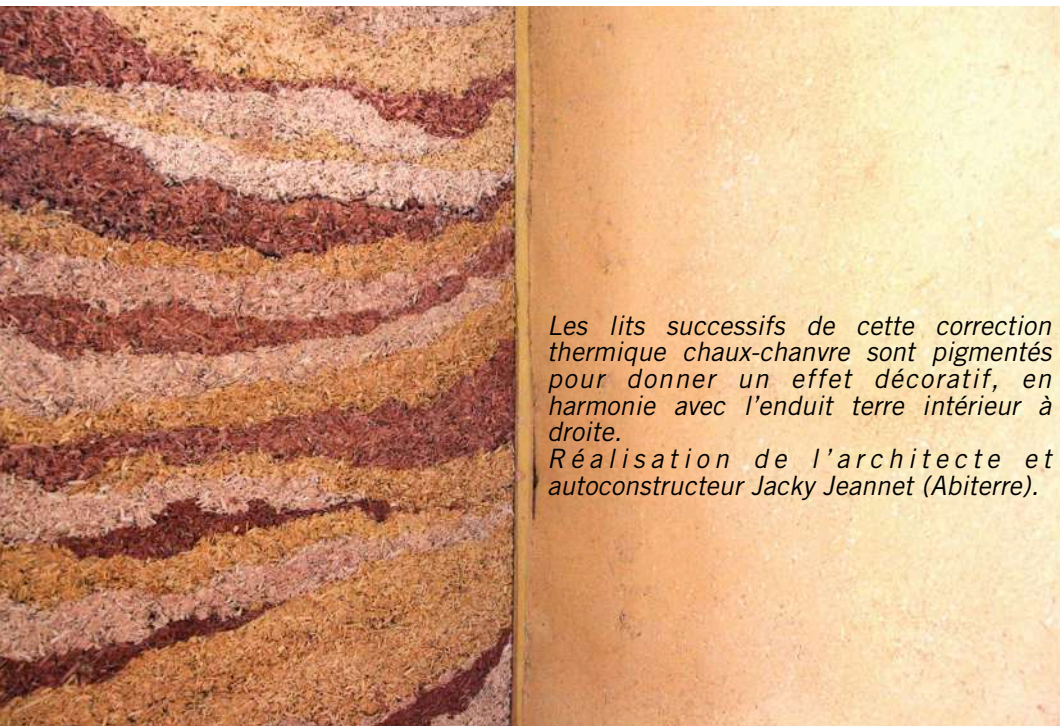


Dans le cas d'une construction existante, avant toute opération de rénovation thermique, il convient de se questionner sur les raisons que l'on aurait d'isoler. La première raison, d'ordre financier, ne doit pas être le seul aspect à considérer, mais il convient d'avoir à l'esprit les impacts environnementaux d'une intervention de ce type. D'une part, les matériaux isolant ont un coût de fabrication, de mise en œuvre et de recyclage non négligeable, et d'autre part, le vieillissement peut les rendre obsolètes voire conduire à des dommages sur l'habitation.

Ensuite, il faut s'assurer qu'il n'existe pas d'autres leviers d'action possible pour améliorer le confort thermique.

Il est nécessaire de s'assurer que la teneur en eau dans les murs en pisé reste faible, ce qui implique de vérifier le bon drainage du mur afin de minimiser les remontées capillaires, ainsi que le bon fonctionnement des éléments de couverture et d'évacuation, qui sont la source de pathologies. Il faut s'assurer de la nature de l'enduit, la présence de ciment empêchant les échanges de vapeur alors emprisonnée dans le mur et augmentant les risques de pathologie. Il faut s'assurer que l'énergie de chauffage utilisée est la plus adaptée, sachant qu'un chauffage rayonnant est ce qui permet au mur de se charger efficacement en énergie. Par ailleurs, on doit se questionner sur tout élément extérieur qui projetterait une ombre importante sur les murs, empêchant ainsi de bénéficier des apports solaires, par exemple en milieu urbain.

Les interventions d'isolation pourront donc arriver en dernier recours après analyse de tous ces aspects. Si la nécessité d'isoler est avérée, il convient de prendre les décisions pour chaque mur en fonction de l'utilisation de la pièce concernée et de son orientation. En effet, les parois ayant des orientations différentes bénéficieront d'apports solaires différents, lesquels varient avec les saisons.



Les lits successifs de cette correction thermique chaux-chanvre sont pigmentés pour donner un effet décoratif, en harmonie avec l'enduit terre intérieur à droite.

Réalisation de l'architecte et autoconstructeur Jacky Jeannet (Abiterre).

Deux voies sont alors envisageables: une isolation par l'extérieur ou par l'intérieur.

A noter, qu'au vu du comportement du pisé décrit précédemment, les seules certitudes scientifiques conduisent à contre-indiquer toute utilisation d'isolant étanche à la vapeur d'eau.

Les types d'isolation du pisé décrits dans la suite de l'article constituent un éventail d'essais mis en œuvre sur le terrain, qui permettront dans un certain nombre d'années d'avoir des retours d'expérience pratiques, mais pour l'heure, ils ne s'appuient sur aucune validation scientifique.

En rénovation, l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) présente l'avantage de faciliter le traitement des ponts thermiques et de conserver le mur en terre à l'intérieur du volume chaud, dynamisant ainsi sa capacité d'échange avec l'air intérieur. Le matériau isolant choisi doit avoir une [résistance à la diffusion de la vapeur](#) (valeur $S_d = \mu \times \text{épaisseur}$) inférieure à celle du pisé afin de conserver les possibilités de transfert à travers la paroi. Il conviendra de s'interroger sur la stabilité à l'eau d'un tel isolant (gonflement, moisissure,...), donc à sa pérennité dans le temps, à l'échelle de la durée de vie de la structure. Par exemple, l'architecte Jacky Jeannet (AbiTerre) propose une ossature bois supportant des panneaux de fibres de bois protégés par un pare-pluie et un bardage bois ventilé.

En isolation par l'intérieur (ITI), pour protéger l'isolant de la condensation en son sein, il est recommandé, voire obligatoire en zone climatique froide H1 (Nord, Est, Alpes, Massif Central), de poser un pare-vapeur côté chauffé, par-dessus l'isolant. Dans ce cas, l'air du logement ne peut plus profiter des échanges avec le pisé, et la gestion de l'hygrométrie doit être assurée par la ventilation et l'aération. (A noter d'ailleurs que le pisé ne peut pas à lui seul sans dommage assurer l'évacuation de l'excès de vapeur de pièces humides.)

Le mur isolé par l'intérieur ne bénéficie plus de la chaleur du logement, ce qui favorise la condensation dans le mur. Si celui-ci est bien protégé des remontées capillaires et infiltrations, et si sa surface extérieure est nue ou revêtue d'un enduit perméant à la vapeur (enduit ciment proscrit), si le pare-vapeur est sans discontinuité, le mur en terre ne devrait pas subir d'humidification excessive. Si une de ces conditions n'est pas remplie, il y a risque de pathologie accru par l'ITI. Il semble alors préférable, soit de se contenter de couper le phénomène de paroi froide par un écran, soit d'améliorer la résistance thermique par une correction thermique modérée et perméante. Une ancienne technique ayant fait ses preuves consiste à doubler les murs Nord par une mince cloison en briques ou autres (plaque de plâtre, lambris,...) avec lame d'air ventilée. Le maçon isérois Bernard Mermet propose quant à lui une correction thermique intérieure en blocs chaux-chanvre collés et enduits à la chaux.

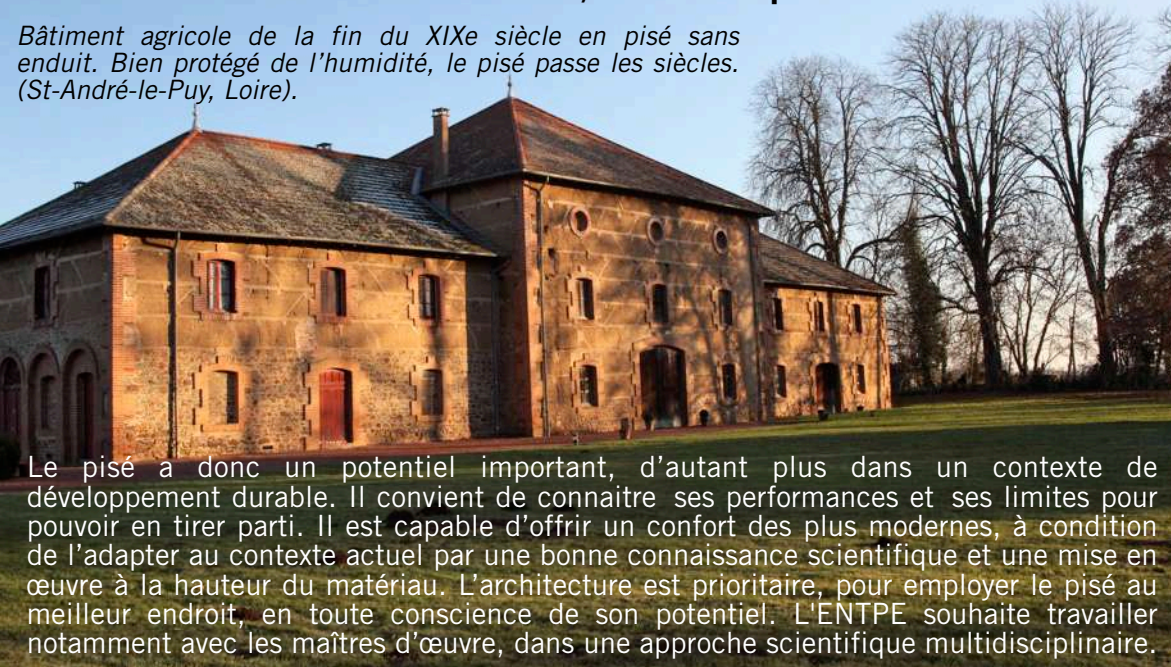
Nous n'avons pas le recul nécessaire, aujourd'hui, pour préconiser ces nouveaux systèmes constructifs, mais leur étude fine et leur optimisation est clairement un des objectifs majeurs de la recherche scientifique sur les constructions en pisé.

[4\) télécharger l'article "isolation et préfabrication, les nouveaux enjeux du pisé", revue Qualité Construction N°144 publiée par l'AQC en 2014](#)

[\(5\) télécharger l'article "La construction paille dans la cours des grands", revue Qualité Construction N°147 publiée par l'AQC en 2014](#)

[\(6\) une correction thermique supprime la sensation de paroi froide sans être aussi performante qu'une isolation. Par exemple, la résistance thermique R de 10 cm de chaux-chanvre sera proche de \$R = 0,9 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}\$ alors que 10 cm de fibre de bois atteindra \$R = 2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}\$.](#)

Bâtiment agricole de la fin du XIXe siècle en pisé sans enduit. Bien protégé de l'humidité, le pisé passe les siècles. (St-André-le-Puy, Loire).



La salle de loisirs communale de St-André-le-Coq (Puy-de-Dôme), réalisée en 1992 par les architectes Jacky Jeannet et Pascal Scarato (Abiterre), associe pisé et murs intérieurs non-porteurs en briques de terre extrudées.



GLOSSAIRE

GREB : acronyme de Groupe de Recherche Ecologique de la Baie. Association d'écoconstructeurs québécois à l'origine d'une technique de construction de murs en bottes de paille à ossature bois externe en petites sections, dont le contreventement est assuré par un enduit épais coulé sur les deux faces.

Le coefficient μ de résistance à la diffusion de vapeur d'eau est une grandeur sans dimension, rapport entre la résistance à la diffusion de vapeur d'eau du matériau et celle de l'air sec. Par définition : μ (air) = 1. Les matériaux à valeur de μ de l'ordre de 10 ou inférieure sont facilement traversés par la vapeur.

La valeur S_d de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau est l'épaisseur en mètres de la couche d'air opposant la même résistance à la diffusion de la vapeur que le matériau. Elle est proportionnelle à son coefficient μ et à son épaisseur e (en m) : $S_d = \mu \times e$.

L'évacuation de vapeur de l'intérieur d'un logement vers l'extérieur au travers une paroi composée de plusieurs couches de matériaux sera facilitée par la succession de couches de moins en moins résistantes (valeurs S_d décroissantes).

La porosité ϵ d'un matériau est le rapport du volumes des vides sur son volume total. La porosité est dite "fermée" quand les vides ne communiquent pas entre eux. Elle est dite "ouverte" dans le cas contraire.

La perméabilité à la vapeur δ_p d'un matériau est sa capacité à se laisser traverser par la vapeur sous l'action d'une différence de pression entre ses deux faces. La perméabilité à la vapeur s'exprime en kg/m.s.Pa.

La perméance à la vapeur d'eau W_p d'un matériau est le rapport de sa perméabilité δ_p sur son épaisseur (en m) : $W_p = \delta_p / e$. Elle s'exprime en kg/m².s.Pa.

La courbe isotherme de sorption représente l'accroissement de teneur en eau d'un matériau poreux en fonction de l'humidité relative de l'air, à température donnée.