

Influence de la composition du mortier de terre crue sur son comportement à haute température

Jordan Tadonbou^{1,2}, Prosper Pliya¹, Anne-Lise Beaucour¹, Paulina Faria², Albert Noumowe¹

¹ L2MGC CY Cergy Paris Université, 5 Mail Gay Lussac, Neuville sur Oise F-95031 Cergy-Pontoise, France.

² CERIS, NOVA School of Science and Technology, NOVA University Lisbon, 2829-516 Caparica, Portugal.

RESUME : Les mortiers de terre crue sont utilisés comme mortiers de montage pour la construction de murs en maçonnerie, comme enduits et dans la réparation de structures en terre. Très peu d'études se sont concentrées sur le comportement des éléments de maçonnerie en terre crue soumis à des températures élevées. Cette étude vise à comprendre l'influence de diverses compositions de mortiers de terre soumises à des températures élevées. La nature minéralogique et la fraction volumétrique du granulat utilisé peuvent avoir une influence sur le comportement à haute température des mortiers de terre. Dans le cadre de cette étude, des mortiers de terre ont été formulés en utilisant une terre argilo-limoneuse, du sable silico-calcaire et des déchets de briques de terre cuite (chamotte). Trois fractions volumétriques de sable/terre argilo-limoneuse et deux pourcentages de substitution volumique du sable par la chamotte sont choisis. Les propriétés physiques et mécaniques à la température ambiante et après différents cycles de chauffage/refroidissement ont été déterminées. Un effet défavorable du sable silico-calcaire a été observé au-delà de 400°C et à la température de 800°C, les mortiers contenant le sable silico-calcaire ont été fortement dégradés en raison de la décarbonatation des granulats calcaires. A contrario, la substitution du sable par la chamotte a eu un effet positif à haute température.

Mots-clefs : Mortiers de terre crue, Haute température, Propriétés résiduelles.

I. INTRODUCTION

La prise de conscience croissante de l'impact environnemental du secteur de la construction a conduit à des efforts pour réduire son empreinte carbone. Dans ce contexte, les méthodes de construction traditionnelles, en particulier la construction en terre crue, suscitent un intérêt croissant. D'un point de vue environnemental, (Arduin et al., 2022) ont montré que les techniques de construction en terre offrent de meilleures performances environnementales que les constructions en matériaux de construction conventionnels en termes d'émission de gaz à effet de serre et d'énergie grise. En termes de propriétés hygrothermiques, la terre crue agit comme un régulateur hygrométrique et thermique, stabilisant l'humidité relative intérieure plus rapidement que d'autres matériaux de construction (Minke, 2006). Les mortiers de terre crue pourraient également être une alternative écologique pour fournir de protection pour les structures en bois ou les panneaux bio-isolants. Il y a peu de données sur le comportement des matériaux et structures en terre crue soumis à un incendie ce qui constitue un frein pour le développement de ces matériaux. Les rares études sur la résistance au feu des matériaux en terre se sont concentrées sur les briques de terre comprimée et stabilisées au ciment (Abdallah et al., 2024) et les briques de

terre extrudée (Siyapze et al., 2023). Pour les matériaux composés exclusivement de limon argileux, une augmentation de la résistance résiduelle après chauffage-refroidissement avec la température est observée. Cette augmentation de la résistance est due à la déshydratation et à la déshydroxylation des minéraux argileux entre 0 et 600°C (Bruno et al., 2019) et à la vitrification de la matrice argileuse entre 600°C et 800°C (Bruno et al., 2019). Les mortiers contrairement aux briques sont un mélange de sol fin et une plus grande proportion de sable dont la minéralogie peut être diverse. L'influence positive de l'argile en termes d'augmentation de résistance avec la température peut être amenuisée par la présence de sable et les connaissances actuelles ne permettent pas d'estimer l'influence de la minéralogie du sable ni celle de sa fraction volumique.

L'objectif de cette étude est de développer de nouveaux mortiers de terre basés sur une terre limoneuse, du sable naturel et des déchets de briques de terre cuite (chamotte) qui peuvent être utilisés comme mortiers de hourdage et d'enduit de revêtement intérieurs pour limiter le transfert de chaleur dans une situation d'incendie. Dans un premier temps, différents mortiers ont été formulés et leurs propriétés à l'état frais et durci à la température ambiante ont été déterminées. Il s'agira principalement des mesures du retrait de séchage, de la résistance à la compression et à la traction par flexion. Dans un deuxième temps, les éprouvettes de mortiers confectionnées ont été soumises à différents cycles de chauffage/refroidissement de la température ambiante à 800°C pour la caractérisation résiduelle.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude proviennent de la briqueterie "DeWulf". Les mortiers de terre ont été fabriqués avec une terre limoneuse (Limon des plateaux de la région de Beauvais), un sable silico-calcaire (S) de classe granulaire 0-4 mm et de la chamotte (déchets de briques de terre cuite broyées) de classes granulaires 0-2 mm, et 0-4 mm, noté respectivement $W_{(0/2)}$ et $W_{(0/4)}$. W représente le mélange de chamotte $W_{(0/2)}$ et $W_{(0/4)}$ avec une proportion volumique de 50% chacun. SW représente le mélange de sable et de chamotte avec une proportion volumique de 50% chacun. Ces pourcentages permettent d'avoir une distribution granulométrique similaire à celle du sable (S). Les limites de liquidité, de plasticité et l'indice de plasticité de la terre limoneuse sont respectivement de 31%, 19% et 12%, déterminés par la méthode Casagrande (selon la norme (EN ISO 17892-12, 2018)). Les densités apparentes sèches des granulats ont été déterminées après séchage à la température de 110°C dans une étuve jusqu'à masse constante et celle de la terre limoneuse a été déterminée après séchage jusqu'à masse constante dans une étuve à 40°C. L'absorption d'eau des granulats a été déterminée selon la norme (EN 1097-6 ,2022). Les caractéristiques des matériaux sont présentées dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Caractéristiques des matières premières (moyenne et écart-type)

	Sable S	Chamotte $W_{(0/4)}$	Chamotte $W_{(0/2)}$	Argile limoneuse
Absorption d'eau (%)	$1,0 \pm 0,02$	$3,50 \pm 0,03$	$1,85 \pm 0,02$	-
Densité apparente sèche (g/cm^3)	$1,74 \pm 0,01$	$1,29 \pm 0,01$	$1,25 \pm 0,01$	$1,24 \pm 0,0$

B. Mortiers, caractérisation à l'état frais et échantillons

Trois mortiers (M-XS) ont été préparés avec du sable et de la terre argilo-limoneuse. X représente le volume de sable utilisé pour 1 volume de terre limoneuse. Les valeurs X utilisées sont de 2, 2,5 et 3 et proviennent du (Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue, 2022). Deux mortiers ont été préparés avec de la chamotte en substituant un volume de 50% (M-2.5SW) et 100% (M-2.5W) de sable de la formulation de mortier M-2.5S. Des tests préliminaires ont été effectués sur les différents mortiers afin de déterminer la quantité d'eau totale permettant d'avoir un étalement relativement constant. Le Tableau 2 résume les différentes formulations de mortier et la quantité totale d'eau ajoutée lors du mélange des matériaux secs.

TABLEAU 2. Composition des mélanges de mortier de terre crue pour un volume de terre

Mortiers	Argile limoneuse	Sable (S)	Chamotte (W)	Eau (% en masse)
M-3S	1	3	-	17,9
M-2.5S	1	2,5	-	17,8
M-2S	1	2	-	17,7
M-2.5SW	1	1,25	1,25	19,3
M-2.5W	1	-	2,5	24,1

Procédure de mélange : le mélange a été effectué en plusieurs étapes. De l'eau a été ajoutée dans le bol du malaxeur et après démarrage, les matières premières pré-mélangées ont été ajoutées progressivement et le malaxage a duré environ 90 secondes. Après un temps de repos de 10 à 15 minutes, un nouveau malaxage de 60 secondes a été effectué avant l'arrêt complet du malaxeur.

Consistance du mortier frais : un dernier malaxage à la truelle a été effectué pendant environ 10 secondes, puis un test d'adhérence à la truelle a été réalisé, selon les pratiques actuelles des maçons. Le but de ce test était de s'assurer que les mortiers pouvaient être correctement appliqués. La consistance des mortiers frais a été déterminée selon la norme (EN 1015-3, 1999). Les tests ont montré que la consistance correspondant à un bon accrochage du mortier frais à la truelle était de 129 ± 5 mm pour tous les mortiers.

Préparation des éprouvettes : pour la préparation des éprouvettes, les mortiers ont été introduits en une seule couche dans des moules en polystyrène et vibrés sur une table vibrante (fréquence = 50Hz ; temps \approx 20 secondes). Deux types d'éprouvettes ont été fabriquées dans cette étude : $4 \times 4 \times 16$ cm³ pour la détermination des résistances mécaniques et $4 \times 7,5 \times 9$ cm³ pour la mesure de la conductivité thermique. Les échantillons moulés ont été stockés en laboratoire à une température de 22 ± 4 °C et une humidité relative de $60 \pm 5\%$.

C. Essais sur les éprouvettes de mortier

Evolution de la perte de masse et du retrait linéaire au cours du séchage : pour évaluer la perte de masse des mortiers avant démoulage, les masses des moules ont été mesurées avant remplissage par les mortiers et avant démoulage. La perte de masse et le retrait linéaire ont respectivement été déterminés selon l'équation 1 et l'équation 2.

$$\text{perte de masse (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{retrait linéaire (\%)} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100 \quad (2)$$

Ici, m_1 représente la masse de 3 éprouvettes prismatiques plus la masse du moule juste après avoir été moulées ; m_2 représente la masse moyenne des mêmes 3 éprouvettes prismatiques plus la masse du moule juste avant le démoulage et m_3 représente la masse du moule vide qui reste constant. L_1 représente la longueur du moule (16 cm) et L_2 la longueur de l'éprouvette démoulée.

Les mesures de perte de masse et de retrait linéaire après démoulage ont été effectuées sur 15 éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ de chaque composition de mortier jusqu'à stabilisation de la masse, selon la norme (DIN 18946, 2018). Les éprouvettes ont été démoulées dix jours après le gâchage.

Conductivité thermique : elle a été mesurée à l'aide d'un système HOT Disk TPS 1500 contrôlé par ordinateur (Log and Gustafsson, 1995).

Vitesse des ultrasons : elle a été obtenue à l'aide de l'équipement Pundit Lab-Proceq en mesurant le temps de propagation de l'onde (t en μs) entre les deux sommets des échantillons de 16 cm de long (L). La vitesse des US a été calculée (V en m/s) en divisant L par t . La valeur retenue est la moyenne de trois mesures effectuées sur chaque éprouvette.

Résistance à la traction par flexion 3 points et résistance à la compression : les essais mécaniques ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique Instron d'une capacité de 30 kN. Les vitesses de chargement sont 0.007mm/s et 0.013mm/s respectivement pour l'essai en traction par flexion et l'essai de résistance à la compression. Ces vitesses de chargement ont été choisies pour répondre aux critères de la norme (DIN 18946, 2018).

Essai de chauffage/refroidissement : les échantillons de mortier ont été soumis à différents cycles de chauffage et de refroidissement, de la température ambiante à 200°C, 400°C, 600°C et 800°C. Chaque cycle de chauffage-refroidissement comprenait une phase d'augmentation de la température à une vitesse de 1°C/min, d'un plateau de température constante d'une durée de deux heures et d'une phase de refroidissement jusqu'à la température ambiante à la vitesse théorique de -1°C/min. Des thermocouples de type K ont été placés dans le four afin de suivre l'évolution de la température.

Analyse TG/DSC : une analyse thermogravimétrique (ATG) a été réalisée à l'aide d'un appareil Jupr STA 449 F1 développé par Netzsch. Chaque matière première (environ 100 mg) a été soumise à une vitesse de chauffage de 10°C/min de 20°C à 1100°C sous une atmosphère inerte (azote). La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est effectuée en parallèle avec l'analyse TG.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Pertes de masse et retrait linéaire durant le séchage

Perte de masse : la figure 1. (a) montre l'évolution de la perte de masse des différents mortiers. Avant démoulage, les pertes de masse sont de $2,3 \pm 0,2\%$, $2,0 \pm 0,2\%$, $2,4 \pm 0,3\%$ et $2,1 \pm 0,2\%$ respectivement pour les mortiers M-3S, M-2.5S, M-2S, M-2.5SW et M-2.5W. Ces valeurs sont évidemment inférieures aux pertes de masse après démoulage et stabilisation qui sont respectivement de $11,8 \pm 1,1\%$, $12,6 \pm 1\%$, $11,6 \pm 1,2\%$, $13,4 \pm 0,9\%$ et $18,0 \pm 0,7\%$. On note qu'avant le démoulage, la cinétique de séchage est plus lente. Ceci est dû au fait que l'eau libre s'évapore à travers l'unique surface qui est en contact avec l'atmosphère. Après le démoulage, la cinétique de séchage s'accélère en raison de l'évaporation de l'eau à travers toutes les faces des échantillons jusqu'à ce que l'équilibre hygroscopique soit atteint. Trois jours après le démoulage, l'équilibre hygroscopique semble être atteint et les masses tendent à se stabiliser, ce qui montre que le délai minimum de 14 jours pour le séchage des mortiers de terre crue recommandé par la norme (DIN 18946, 2018) semble correct. Comme l'ont observé (Delinière et al.,2014) les éprouvettes sèchent

très rapidement dès qu'elles sont retirées du moule. La figure 1. (a) montre également qu'après le démoulage, le séchage des échantillons contenant de la chamotte (M-2.5SW et M-2.5W) est plus rapide, probablement en raison de la plus grande porosité des grains de chamotte par rapport aux grains de sable. Les pertes de masse des éprouvettes de mortier M-2.5SW et M-2.5W sont les plus élevées par rapport aux éprouvettes de mortier M-XS probablement parce que, leur teneur en eau de gâchage est plus élevée.

Retrait linéaire : La figure 1. (b) présente le retrait linéaire moyen de séchage obtenu sur 15 éprouvettes par formulation de mortier. Il semble ne pas y avoir de relation évidente entre la perte de masse et le retrait linéaire. Contrairement à la perte de masse, le retrait est plus important avant le démoulage des éprouvettes qu'après. On note qu'après la stabilisation de la masse, les valeurs finales du retrait linéaire et les cinétiques de séchage des mortiers M-2.5SW et M-2.5W (respectivement de 1.53 ± 0.16 % et 1.82 ± 0.19 %) sont plus élevées que celles des mortiers M-3S, M-2.5S et M-2S, qui sont respectivement de 1.24 ± 0.19 %, 1.38 ± 0.20 % et 1.65 ± 0.11 %. Plus le volume de sable est important, moins le retrait est important. En effet, la succion capillaire dans la matrice argileuse pendant le séchage est la cause principale du retrait. Cette succion augmente avec la teneur en argile. L'ajout de granulats permet de limiter ce phénomène (Anglade et al., 2022).

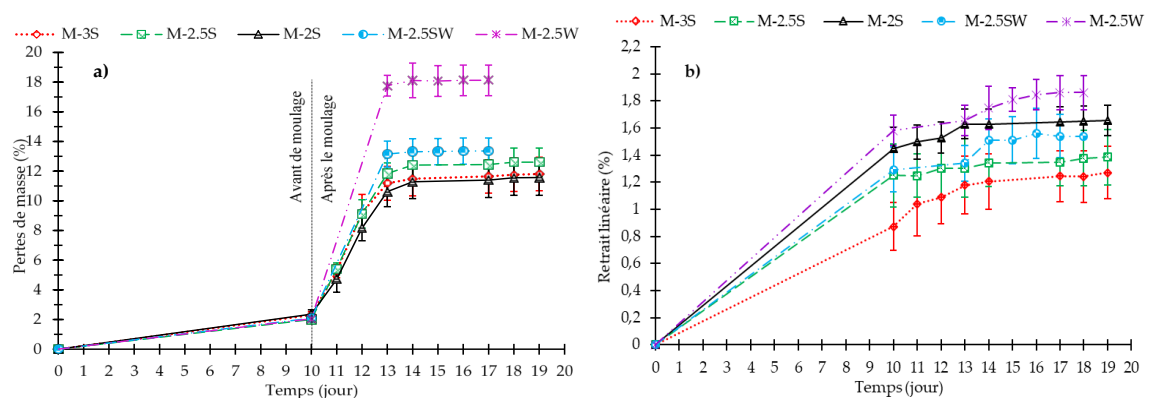


FIGURE 1. Évolution de la perte de masse (a) et du retrait linéaire (b) des éprouvettes de mortier au cours du séchage.

B. Résistance à la compression et à la traction par flexion

La figure 2 présente les résistances à la traction par flexion et à la compression des mortiers après séchage. Les valeurs moyennes se situent entre 1,06 MPa et 1,42 MPa pour la résistance à la traction par flexion et, entre 3,20 MPa et 3,70 MPa pour la résistance à la compression. Une légère amélioration de la résistance à la compression est observée avec le mortier contenant uniquement de la chamotte ($3,37 \pm 0,23$ MPa pour M-2.5S et $3,64 \pm 0,31$ MPa pour M-2.5W). Comme (Pedergnana and Elias-Ozkan, 2021) on note aussi une diminution de la résistance à la compression avec la teneur en granulat ($3,20 \pm 0,36$ MPa pour M-3S et $3,65 \pm 0,29$ MPa pour M-2S).

Cet effet favorable de l'augmentation de la fraction volumique du limon argileux n'est pas observé dans les valeurs de résistance à la traction par flexion. Les mortiers ayant les résistances à la traction par flexion les plus faibles (M-2S et M-2,5W) ont le retrait le plus important. On peut supposer que les microfissures liées au retrait favorisent l'initiation de la rupture par traction. Cependant, étant donné les écarts types, il est difficile de conclure définitivement.

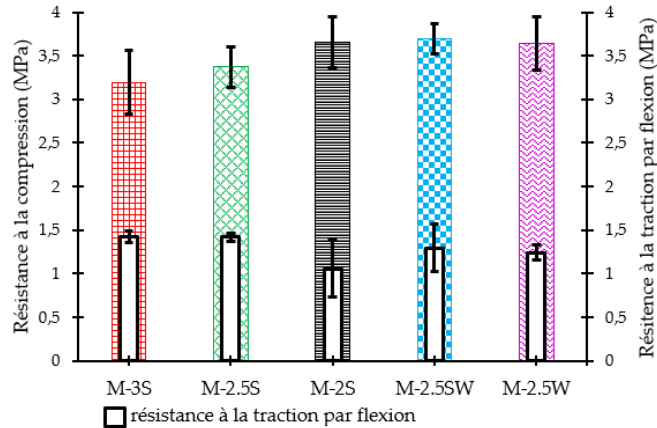


FIGURE 2. Résistance à la compression et à la traction par flexion des mortiers à la température ambiante.

C. Observations après exposition aux différents cycles de chauffage/refroidissement

La figure 3 présente les observations macroscopiques des différentes éprouvettes en fonction de la température (jusqu'à 600°C). A température ambiante, aucune différence n'est observée sur le mortier contenant uniquement du sable (M-XS). Par contre, les mortiers de chamotte, M-2.5SW et M-2.5W, présentent une couleur rougeâtre liée à la couleur initiale de la chamotte. A 200°C, les échantillons présentent la même texture et aucune fissure n'est visible. A partir de 400°C, tous les échantillons sont devenus rouges. La couleur rouge devient plus intense avec l'augmentation de la température. Les échantillons contenant de la chamotte ont plus rougi que les échantillons M-XS. Aucune fissure visible n'a été observée sur les échantillons jusqu'à 600°C. Mais à 800°C (Figure 4), toutes les éprouvettes contenant du sable étaient complètement fissurées dans toutes les directions Ceci pourrait s'expliquer par la décarbonatation de la calcite (Sani, 2018). A l'exception des mesures de masse, il n'était plus possible d'effectuer d'autres essais sur ces éprouvettes. Après seulement une semaine, les multi-fissures se sont transformées en dislocation complète des éprouvettes. Cette dislocation peut s'expliquer par une réabsorption de l'humidité du CaO qui s'accompagne d'une augmentation de volume de 100% (Sani, 2018). Le mortier M-2.5SW présente des fissures plus fines et moins nombreuses que les mortiers M-XS En revanche, les éprouvettes de mortier M-2.5W ne présentaient aucune fissure visible.

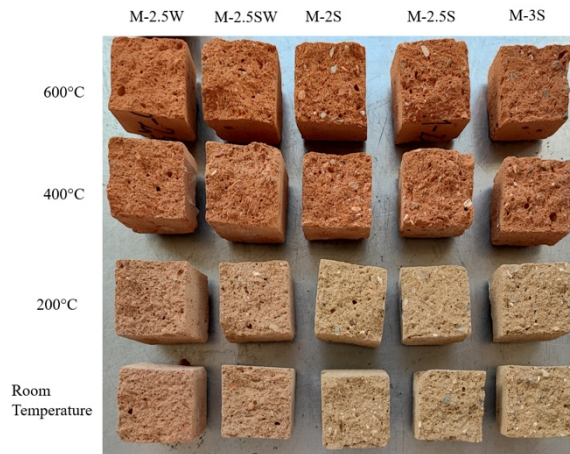


FIGURE 3. Variation de la couleur des éprouvettes en fonction des cycles de chauffage/refroidissement.



FIGURE 4. Faciès de rupture des éprouvettes après le cycle chauffage/refroidissement de 800°C.

D. Analyses TG/DSC

Les résultats du test ATG/DSC effectué sur les matières premières sont présentés dans la Figure 5 sous forme de Courbe de perte de masse (TG) et sa dérivée (DTG) et de courbe DSC en fonction de la température. Cinq zones distinctes peuvent être identifiées :

Zone 1 - [20°C ; 200°C] : dans cette zone, une perte de masse de 1,26% avec un pic DTG autour de 100°C est observée pour le limon argileux. Cette perte de masse correspond au départ libre de l'eau vers 80°C (eau libre) et à l'élimination de l'eau adsorbée et d'intercouche des minéraux argileux entre 100 et 200°C (Igra Pohowe et al., 2023).

Zone 2 - [200 ; 400°C] : dans cette zone, on observe une perte de masse de 0,82% du limon argileux matérialisée par un pic sur la courbe DTG autour de 300°C, qui peut être attribué à la transformation de la goéthite autour de 300°C en oxyde de fer ((Wang et al., 2021),(Sani, 2018)).

Zone 3 - [400 ; 600°C] : dans cette zone, on observe une perte de masse de 1,30% matérialisée par un pic sur la courbe DTG autour de 500°C. Cette perte de masse peut être expliquée par la déshydroxylation entre 450°C et 550°C de la kaolinite présente dans le limon argileux en métakaolin (Sani, 2018). Le pic sur les courbes DSC de toutes les matières premières observé autour de 572°C s'explique par la transformation du quartz- α en quartz- β (Wang et al., 2021).

Zone 4 - [600°C ; 850°C] : dans cette zone, on observe une perte de masse de 0,75% et 0,55% pour le limon argileux et la chamotte W_(0/4) , respectivement. Cette perte de masse matérialisée par un pic sur la courbe DTG autour de 700°C, peut être expliquée par la déshydroxylation des minéraux argileux (illite ou montmorillonite) (Sani, 2018) et des minéraux argileux résiduelles présents dans la chamotte W_(0/4) . Le sable S présente une perte de masse de 8,75% matérialisée par un pic sur la courbe DTG autour de 800°C. Cette perte de masse peut être attribuée à la décarbonatation de la calcite (Sani, 2018).

Zone 5 au-delà de 850°C : dans cette zone, aucune transformation particulière n'est observée.

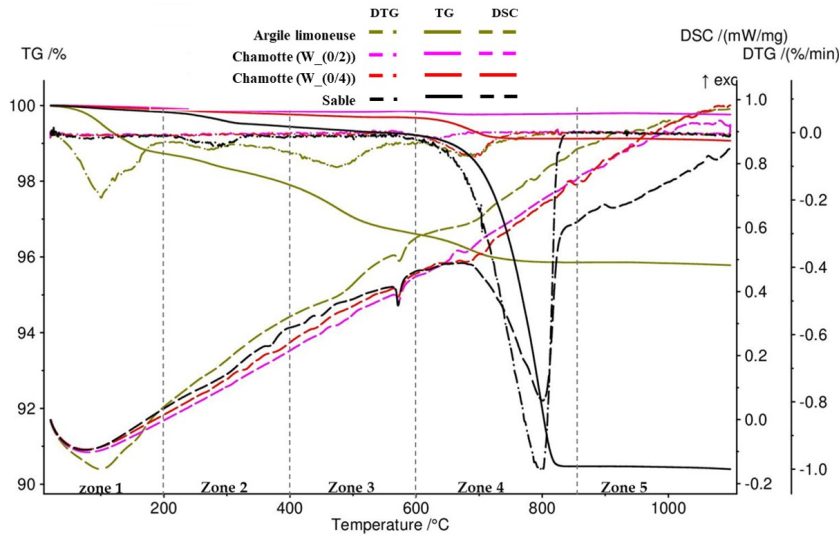


FIGURE 5. Courbes ATG/DSC jusqu'à 1200°C.

E. Vitesse des ondes ultrasonores et conductivités thermiques

Vitesse des ondes ultrasonores (US) : La figure 6. (a) présente l'évolution de la vitesse des ondes ultrasonores sur les éprouvettes des différents mortiers. A température ambiante, les vitesses d'onde US des éprouvettes de mortiers M-3S, M-2,5S, M-2S, M-2,5SW et M-2,5W (en km/s) sont respectivement de $2,36 \pm 0,01$; $2,32 \pm 0,03$; $2,36 \pm 0,02$; $2,15 \pm 0,01$ et $1,85 \pm 0,01$. Après 200°C. les vitesses d'onde US diminuent avec la température. Cette diminution est accentuée par l'augmentation de la quantité de sable. Par rapport à la température ambiante, on observe à la température de 600°C une diminution de 51%, 48%, 42%, 41% et 17% pour les mortiers respectivement M-3S, M-2,5S, M-2S, M-2,5SW, et M-2,5W, et à 800°C le mortier M-2,5W subit une diminution de 26%. Le mortier avec une substitution de 100% du sable par de la chamotte (M-2.5W) ne montre aucune réduction de la vitesse US jusqu'à 400°C et une diminution faible après 400°C. Pour les mortiers M-XS, la diminution de la vitesse US est plus faible lorsque la teneur en limon argileux augmente. Ce résultat montre que la présence de sable semble endommager le mortier au-delà de 200°C.

Conductivité thermique : La figure 6. (b) montre que les conductivités thermiques résiduelles, mesurées après refroidissement des différents mortiers diminuent avec la température. A température ambiante, les éprouvettes de mortiers M-3S, M-2,5S, M-2S, M-2,5SW et M-2,5W (en W/mK) ont des conductivités thermiques respectives de $1,38 \pm 0,01$; $1,46 \pm 0,01$; $1,49 \pm 0,09$; $1,13 \pm 0,00$ et $0,80 \pm 0,00$. La porosité contenue dans les grains de chamotte entraîne une diminution de la conductivité thermique. La teneur en quartz du sable, dont la conductivité thermique est plus élevée que celle de l'argile, joue également un rôle dans la valeur de conductivité des mortiers M-XS. À 600 °C, elles enregistrent respectivement une baisse de 34%, 29%, 26%, 29% et 25 et A 800°C, la conductivité thermique de M-2,5W chute à 31,26%. Ce résultat est en corrélation avec l'évolution de la vitesse ultrasonique. Les diminutions des conductivités thermiques, plus importante dans les mortiers de sable peuvent être en partie attribuées à la décohésion des grains de sable de la matrice argileuse, ce qui augmente la porosité. La déshydratation et à la déshydroxylation des minéraux argileux au cours du chauffage pourrait contribuer à la diminution de la conductivité des mortiers de chamotte.

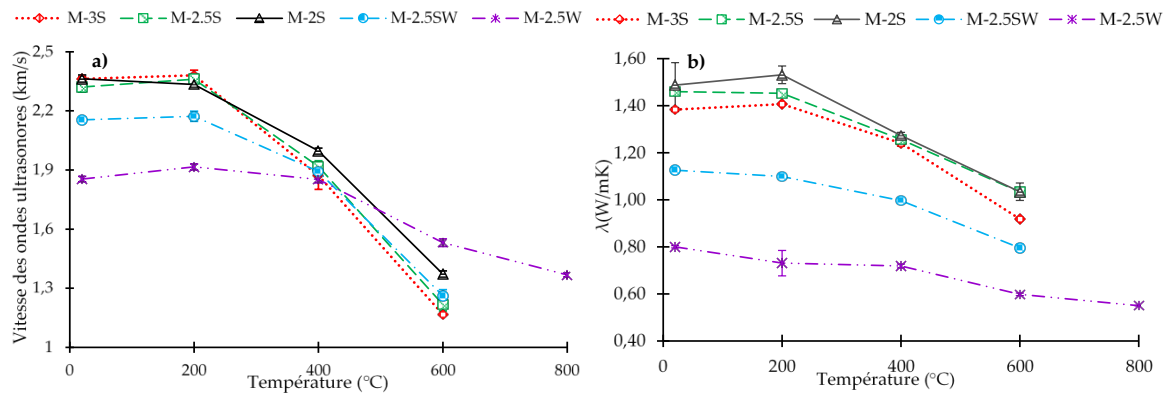


FIGURE 6. Évolution de la vitesse ultrasonique (a) et de la conductivité thermique (b) des mortiers en fonction du cycle de chauffage/refroidissement.

F. Résistances mécaniques

Résistances résiduelles à la compression : La figure 7. (a) présente l'évolution de la résistance à la compression des différents mortiers. A la température ambiante, les résistances à la compression des mortiers M-3S, M-2,5S, M-2S, M-2,5SW et M-2,5W (en MPa) sont respectivement de $3,20 \pm 0,36$; $3,37 \pm 0,23$; $3,65 \pm 0,29$; $3,69 \pm 0,17$ et $3,64 \pm 0,31$. A la température de 600 °C, les mortiers M-3S, M-2,5S, M-2S, M-2,5SW et M-2,5W enregistrent respectivement une augmentation de résistance de 58%, 52%, 75%, 82% et 99%. Cette augmentation de la résistance résiduelle à la compression est attribuée successivement à la déshydratation et à la déshydroxylation des minéraux argileux (Igra Pohowe et al., 2023), (Siyapze et al., 2023). La présence de sable semble limiter l'augmentation de la résistance avec la température entre 400°C et 600°C. Cette limitation pourrait être attribuée à la perte d'adhérence entre les grains de limon argileux et de sable. En effet, la transformation du quartz- α en quartz- β s'accompagne d'une dilatation (Sani, 2018) créant des contraintes qui finissent par générer des microfissures. A 800°C, la résistance à la compression résiduelle du mortier M-2,5W augmente de 148%.

Résistances résiduelles à la traction par flexion : La figure 7. (b) montre que les résistances à la traction par flexion résiduelle des différents mortiers diminuent à partir de 200°C, sauf pour le M-2,5W. Sachant qu'à la température ambiante les résistances à la traction par flexion des mortiers M-3S, M-2,5S, M-2S, M-2,5SW et M-2,5W (en MPa) sont respectivement de $1,42 \pm 0,06$; $1,42 \pm 0,05$; $1,06 \pm 0,32$; $1,29 \pm 0,27$; $1,2 \pm 0,09$, à la température de 600 °C, les mortiers M-3S, M-2,5S, M-2S et M-2,5SW enregistrent une baisse de résistance de 69%, 52%, 18% et 36% respectivement pour les échantillons. Par contre la résistance à la traction par flexion des mortiers M-2,5W reste plus élevée de 5% à 600°C et ne diminue que de 7% à 800°C. Pour les échantillons M-XS, la perte de résistance est liée à la teneur en sable. La résistance à la traction par flexion semble plus affectée par le sable que la résistance à la compression. Cela s'explique par le fait que la résistance à la traction par flexion est fortement influencée par l'interface matrice argileuse/sable, ainsi que par la présence de microfissures après séchage. On peut aussi supposer que la déformation thermique différentielle entre le sable en expansion et le limon argileux en contraction peut générer des contraintes à l'interface pendant le chauffage, ce qui peut affaiblir la liaison de l'interface. Il convient de noter que la résistance à la traction par flexion de M-2,5W, a subi une légère diminution après de 400°C, contrairement à sa résistance à la compression qui augmente continuellement entre 200°C et 800°C.

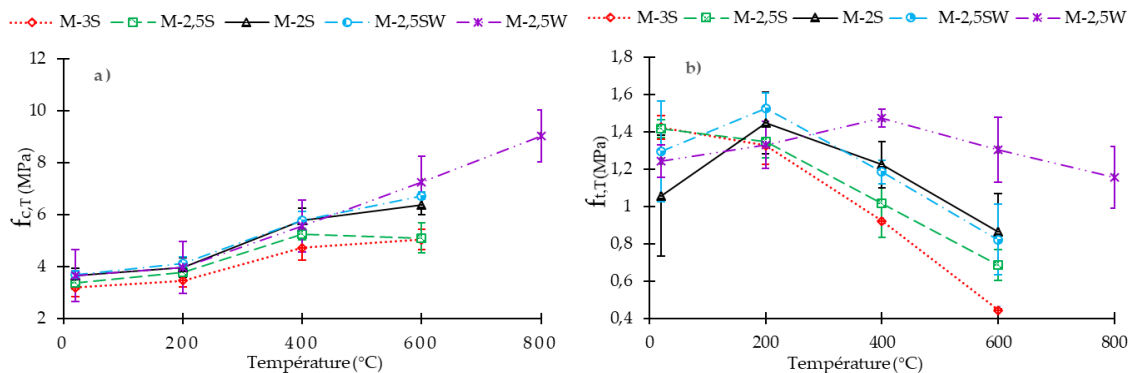


FIGURE 7. Évolution de la résistance à la compression (a) et à la traction par flexion (b) après un cycle de chauffage-refroidissement en fonction de la température de chauffage.

IV. CONCLUSION

Cette étude a examiné l'effet de températures élevées sur cinq mortiers de terre crue fabriqués avec une terre limono-argileuse, du sable silico-calcaire et de la chamotte.

À température ambiante, l'étude a montré que la présence des granulats limitait le retrait linéaire de séchage et qu'aucune fissure n'était visible sur les mortiers testés. La substitution du sable par la chamotte a conduit à une augmentation du retrait sans compromettre les performances mécaniques. Les cinq mortiers ont présenté des valeurs de résistance mécanique très supérieures aux valeurs minimales définies dans les normes DIN 18946 (pour les mortiers de terre crue) et DIN 18947 (pour les enduits de terre). La conductivité thermique s'est avérée peu sensible à la teneur en sable, mais a été considérablement réduite par l'utilisation de la chamotte.

À haute température, le mortier M-2,5W a présenté une perte de masse minimale tandis que les mortiers contenant du sable ont présenté une perte de masse plus importante. Les mesures de vitesses des ondes ultrasoniques ont montré une faible sensibilité à la teneur en sable et diminuait significativement après 200°C. La diminution était moins marquée sur le mortier M-2,5W. La conductivité thermique a diminué après 200°C pour tous les mortiers, et ceux contenant de la chamotte sont toujours restés inférieurs à ceux contenant du sable. La résistance à la compression de tous les échantillons a augmenté avec la température jusqu'à 600°C pour les mortiers contenant le sable et 800°C pour M-2,5W. La résistance à la traction par flexion a diminué après 200°C, en particulier pour M-3S. La résistance à la traction par flexion de M-2,5W a augmenté jusqu'à 400°C avant de diminuer légèrement jusqu'à 800°C.

En résumé, cette étude a mis en évidence l'effet négatif du sable silico-calcaire sur les mortiers de terre crue en situation d'incendie et a permis de développer une formulation de mortier de terre (M-2,5W) qui présente de très bonnes performances à température ambiante et à haute température (au moins jusqu'à 800°C). Ce mortier est produit uniquement à partir de déchets, ce qui constitue un avantage écologique : une terre limono-argileuse provenant de sites d'excavation et des déchets de briques provenant d'usines produisant de la céramique rouge. Il peut être utilisé à la fois comme mortier de hourdage et de jointoiement pour la maçonnerie en terre et comme enduit de terre crue. En guise de perspective, des essais type incendie sur ces mortiers et enduits en terre crue doivent être réalisées afin d'évaluer la durée de l'isolation au feu.

Remerciements : Cette recherche a été rendue possible grâce au programme de cotutelle EUTOPIA.

V. REFERENCES

- Abdallah, R., Carré, H., Perlot, C., La Borderie, C., El Ghoche, H., 2024. Study of the risk of instability in earthen bricks subjected to fire. *Mater Struct* 57, 16. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02284-9>
- Anglade, E., Aubert, J.-E., Sellier, A., Papon, A., 2022. Physical and mechanical properties of clay-sand mixes to assess the performance of earth construction materials. *Journal of Building Engineering* 51, 104229. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104229>
- Arduin, D., Caldas, L.R., Paiva, R. de L.M., Rocha, F., 2022. Life Cycle Assessment (LCA) in Earth Construction: A Systematic Literature Review Considering Five Construction Techniques. *Sustainability* 14, 13228. <https://doi.org/10.3390/su142013228>
- Bruno, A.W., Gallipoli, D., Perlot, C., Mendes, J., 2019. Optimization of bricks production by earth hypercompaction prior to firing. *Journal of Cleaner Production* 214, 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.302>
- Delinière, R., Aubert, J.E., Rojat, F., Gasc-Barbier, M., 2014. Physical, mineralogical and mechanical characterization of ready-mixed clay plaster. *Building and Environment* 80, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.012>
- DIN 18946, Earth masonry mortar - Requirements, test and labelling, 2018.
- EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry - Part 3 : determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 1999.
- EN 1097-6, Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6 : determination of particle density and water absorption, 2022.
- EN ISO 17892-12, Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12 : determination of liquid and plastic limits, 2018.
- Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue, 2022. . France.
- Igra Pohowe, S., Abdallah, R., Pliya, P., Beaucour, A.-L., 2023. Influence of sawdust and flax shives on the high temperature mechanical behavior of earthen materials. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.240>
- Log, T., Gustafsson, S.E., 1995. Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials. *Fire and Materials* 19, 43–49. <https://doi.org/10.1002/fam.810190107>
- Minke, G. (Ed.), 2006. The properties of earth as a building material, in: *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser, Basel, pp. 19–35. https://doi.org/10.1007/3-7643-7873-5_2
- Pedergrana, M., Elias-Ozkan, S.T., 2021. Impact of various sands and fibres on the physical and mechanical properties of earth mortars for plasters and renders. *Construction and Building Materials* 308, 125013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125013>
- Sani, R., 2018. Étude des transformations microstructurales de mélanges argile/Combustibles Solides de Récupération (CSR) lors de la cuisson : relations entre propriétés physico-chimiques, mécaniques et thermiques.
- Siyapze, F., Pliya, P., Abdallah, R., Beaucour, A.-L., 2023. Influence of sawdust and soil type on the high temperature behavior of raw earth bricks. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.093>
- Wang, S., Gaaney, L., Baxter, D., Wang, X., Mackinnon, I.D.R., Xi, Y., 2021. Thermal behaviours of clay mixtures during brick firing: A combined study of in-situ XRD, TGA and thermal dilatometry. *Construction and Building Materials* 299, 124319. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124319>