

Performance et durabilité des mortiers de terre : influence de faible dosage de chaux et de gypse α -hémihydraté

Jordan Tadonbou^{1,2}, Paulina Faria², Prosper Pliya¹, Anne-Lise Beaucour¹, 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 : La terre est un matériau naturel, hygroscopique et très économe en énergie. Pour améliorer sa durabilité à l'eau, des liants tels que la chaux sont généralement ajoutés. Cependant, ces liants, souvent en quantités importantes, compromettent les propriétés hygroscopiques et écologiques du matériau. Dans une étude précédente, un mortier de terre crue composé de terre limono argileux et de déchets de briques de terre cuites (chamotte) a été développé. Du fait de ses bonnes performances mécaniques et thermiques, il a servi de mortier de référence pour tester l'influence de faible quantité de chaux et de gypse hémihydraté (3 %, 6 % et 9 % du volume total du mortier de référence) sur les propriétés mécanique, hygrothermique et de durabilité à l'eau des mortiers de terre. Les propriétés clés telles que le retrait linéaire, la conductivité thermique, la résistance mécanique, l'hygroscopicité et la durabilité à l'eau ont été évaluées sur une durée de plus de 3 mois. Les résultats ont révélé que les liants à base de chaux réduisaient à la fois le retrait et la conductivité thermique. Cependant, ils ont considérablement réduit les résistances mécaniques. En revanche, le gypse a augmenté le retrait, mais amélioré les résistances en compression. Les chaux et le gypse ont eu un effet négligeable sur l'hygroscopicité des mortiers et n'ont pas amélioré la durabilité à l'eau. Seule la formulation NHL à 9 % est restée stable.

Mots-clés : Durabilité à l'eau, hygroscopicité et conductivité thermique, résistance mécanique, chaux, gypse, mortier de terre.

I. INTRODUCTION

La terre, matériau naturel aux propriétés hygroscopiques et énergétiques remarquables, peut voir ses qualités varier par l'ajout de liants, comme la chaux, utilisés pour renforcer sa durabilité. Selon (Gomes et al., 2012), l'ajout de 5 %, 10 % ou 15 % de chaux hydraulique ou aérienne à un mortier de terre entraîne, après 90 jours de cure, une diminution des résistances mécaniques par rapport à celles des mortiers non stabilisés. Ce résultat s'explique par le fait que la chaux rompt les liaisons de la matrice argileuse sans créer un nouveau réseau suffisamment fort pour les remplacer. En général, les études indiquent que pour des ajouts de chaux aérienne compris entre 2% et 6%, la résistance à la compression tend à augmenter, alors que pour des ajouts plus élevés, elle tend à diminuer (Santos et al., 2020). Inversement, la chaux hydraulique n'a un effet positif que lorsqu'elle est utilisée en proportions plus élevées (Santos et al., 2017). (Stathopoulos et al.,

2021) ont étudié l'évolution des propriétés mécaniques de mortiers de terre non stabilisés et de ceux stabilisés avec 20% et 25% de chaux hydraulique naturelle NHL 3,5. Ils ont montré que les mortiers stabilisés présentaient de meilleures résistances à la flexion et à la compression. Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres études (Al-Mukhtar et al., 2010; Maubec et al., 2017). Le principal inconvénient des mortiers de terre est leur faible résistance à l'eau. (Gomes et al., 2012) ont montré que l'ajout de 5%, 10% et 15% de chaux hydraulique et aérienne augmente significativement l'absorption d'eau et la porosité capillaire après 90 jours. L'augmentation étant plus marquée avec la chaux aérienne. De même, (Gomes et al., 2016) ont aussi montré que malgré un coefficient d'absorption d'eau plus élevé, la durabilité à l'eau des mortiers stabilisés n'était pas compromise. En étudiant la durabilité à l'eau de mortiers stabilisés avec 20 % et 25 % de NHL 3,5, (Stathopoulos et al., 2021) ont démontré que les mortiers non stabilisés se détérioraient dès deux cycles humidification/séchage, alors que les échantillons stabilisés ne présentaient aucune dégradation notable même après six cycles. Les isothermes de sorption/désorption sont souvent utilisées pour caractériser les propriétés hygroscopiques des mortiers de terre. (Santos et al., 2020) ont analysé l'influence de la chaux aérienne sur ces isothermes. Ils ont montré que l'enduit de terre non stabilisé présentait une capacité de sorption/désorption nettement supérieure à celle de l'enduit stabilisé. Ce résultat est attribué à la présence de la chaux aérienne, qui bloque la structure argileuse et inhibe son comportement hygroscopique, créant une nouvelle structure où le comportement du mélange est dicté par le liant plus que par l'argile (Gomes et al., 2016). Ces résultats montrent qu'en plus d'augmenter l'empreinte carbone, les stabilisants comme la chaux présentent des inconvénients fonctionnels qui en limitent l'intérêt dans les mortiers de terre. Une faible quantité de liant pourrait constituer un compromis entre performance écologique, physique et mécanique. Dans une étude antérieure, un mortier non stabilisé à base de terre limono argileux et de déchets de briques cuites (chamotte) a présenté de très bonnes performances mécaniques et thermiques. Il a donc été utilisé comme mortier de référence pour étudier l'influence de faibles quantités de chaux et de gypse α -hémihydraté sur les propriétés mécaniques, hygrothermiques et de durabilité à l'eau des mortiers de terre. Des proportions volumiques de 3 %, 6 % et 9 % du volume total du mortier de référence ont été substituées par de la chaux hydraulique NHL 3,5, de la chaux aérienne CL90 et du gypse α -hémihydraté. Les propriétés clés telles que le retrait linéaire, la conductivité thermique, la résistance mécanique, l'hygroscopicité et la durabilité à l'eau ont été évaluées après 1, 2 et 3 mois de conditionnement. Les résultats ont montré que les liants à base de chaux réduisent à la fois le retrait et la conductivité thermique, mais diminuent significativement les résistances mécaniques. En revanche, le gypse augmente le retrait mais améliore la résistance à la compression. La chaux et le gypse α -hémihydraté ont des effets négligeables sur l'hygroscopicité des mortiers et améliorent légèrement leur durabilité à l'eau.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Les mortiers de terre étudiés dans ce travail ont été formulés à partir d'une terre limono-argileuse, combinée à trois types de liants : la chaux hydraulique naturelle (NHL 3.5), la chaux aérienne (CL90) et le gypse α -hémihydraté (GYP). Deux granulométries de déchets de briques cuites (chamotte) ont également été utilisés comme granulats : une fraction granulométrique de 0/2 mm, désignée $W_{(0/2)}$, et une fraction de 0/4 mm, désignée $W_{(0/4)}$. Le mélange de granulats $W_{(0/2)}$ et $W_{(0/4)}$ utilisé dans toutes les formulations, correspond à une combinaison volumique de 50 % de $W_{(0/2)}$ et 50 % de $W_{(0/4)}$. Les limites de liquidité, de plasticité et l'indice de plasticité de la terre limono-

argileuse 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 105°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)

Caractéristiques	Chamotte W_(0/4)	Chamotte W_(0/2)	Gypse	Chaux hydraulique	Chaux aérienne	Terre
Abs	3.50 ± 0.03	1.85 ± 0.02	-	-	-	-
ρ	1.29 ± 0.01	1.25 ± 0.01	1.28 ± 0.01	0.38 ± 0.01	0.7 ± 0.01	1.24
Abs: coefficient absorption d'eau (%); ρ: masse volumique en vrac (g/cm ³).						

B. Formulation et préparation des éprouvettes de mortier

Le mortier de référence a été préparé en mélangeant 2,5 volumes de déchets de briques (W) avec 1 volume de terre. En complément, huit formulations de mortiers ont été stabilisées en utilisant trois types de liants [la chaux hydraulique naturelle (NHL 3.5), la chaux aérienne (CL90) et le gypse α-hémihydraté (GYP)] à des teneurs volumiques de 3 %, 6 % et 9 %. Les formulations sont détaillées dans les Tableaux 2 qui indique les proportions volumiques.

TABLEAU 2. Composition des mélanges de mortier de terre crue pour un volume de terre : proportions volumiques V (cm³) et massiques M (g).

Mortiers	Chamotte		Limon		Chaux hydraulique		Chaux aérienne		Gypse GYP	
	V(cm ³)	M (g)	V(cm ³)	M (g)	V(cm ³)	M (g)	V(cm ³)	M (g)	V(cm ³)	M (g)
M-2,5W	2,5	3,06	1	1,24	-	-	-	-	-	-
3NHL	2,4	2,97	0,97	1,2	0,11	0,07	-	-	-	-
6NHL	2,35	2,89	0,94	1,17	0,21	0,14	-	-	-	-
9NHL	2,28	2,79	0,91	1,13	0,32	0,21	-	-	-	-
3CL	2,43	2,97	0,97	1,2	-	-	0,11	0,04	-	-
6CL	2,35	2,89	0,94	1,17	-	-	0,21	0,07	-	-
9CL	2,28	2,79	0,91	1,13	-	-	0,32	0,12	-	-
3GYP	2,43	2,97	0,97	1,2	-	-	-	-	0,11	0,13
6GYP	2,35	2,89	0,94	1,17	-	-	-	-	0,21	0,27

- **Teneur en eau et consistance :** La teneur en eau du mortier de référence a été fixée à 24 %, ce qui a donné une valeur d'étalement de 131 ± 2 mm. Pour les mortiers contenant 3 % de stabilisant, une teneur en eau de 25 % a été utilisée, correspondant à un étalement mesuré de 112 ± 0,5 mm. Pour les formulations à teneur en liant plus élevée, un rapport eau/liant constant a été maintenu. Ainsi, les mortiers 6NHL et 9NHL ont respectivement présenté des teneurs en eau de 26,9 % (étalement : 119 ± 2 mm) et 28,5 % (étalement : 126 ± 1 mm). De manière similaire, les mortiers 6CL et 9CL avaient des teneurs

en eau de 25,6 % (étalement : 115 ± 1 mm) et 26,2 % (étalement : 119 ± 1 mm), respectivement. Enfin, le mortier 6GYP, avec une teneur en eau de 28,7 %, a présenté une valeur d'étalement de 134 mm.

- **Préparation des éprouvettes** : Les mortiers ont été coulés en une seule couche dans des moules, puis vibrés sur une table vibrante (fréquence de 50 Hz pendant 20 secondes). La surface a ensuite été arasée à l'aide d'une taloche. Trois types d'éprouvettes ont été préparés en fonction des essais à réaliser : des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm³, des éprouvettes cubiques de $4 \times 7 \times 7$ cm³ et des éprouvettes cylindriques de 10 cm de diamètre et 2 cm d'épaisseur. Le séchage a été effectué dans des conditions de laboratoire, à une température de 22 ± 4 °C et une humidité relative de 65 ± 10 %. Les essais ont été réalisés sur ses éprouvettes après masse constante pour le mortier de référence (35 jours) et après 1 mois, 2 mois et 3 mois pour les mortiers stabilisés.

C. Caractérisation des mortiers

- **Retrait linéaire** : Le retrait linéaire après séchage a été mesuré sur six éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16$ cm³) pour chaque formulation de mortier. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un pied à coulisse numérique (sensibilité : 0,01 mm), conformément à la norme (DIN 18946, (2018)).

- **Conductivité thermique** : elle a été mesurée à l'aide d'un système HOT Disk TPS 1500 contrôlé par ordinateur sur des éprouvettes cubiques de $4 \times 7 \times 7$ cm³.

- **Résistance à la flexion et à la compression** : Les essais de résistance mécanique ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique Instron d'une capacité de 30 kN. Les vitesses de chargement ont été fixées à 0,007 mm/s pour la flexion et 0,013 mm/s pour la compression, conformément à la norme (DIN 18946, (2018)), qui recommande un temps de rupture compris entre 30 et 90 secondes pour les deux tests.

- **Résistance à l'abrasion** : La résistance à l'abrasion a été déterminée selon la norme (DIN 18946, (2018)), en mesurant la perte de masse moyenne de trois échantillons cylindrique de mortier d'enduit. Le test consiste à effectuer 20 rotations complètes d'une brosse circulaire en polyéthylène (diamètre 65 mm) appliquée sur la surface de l'éprouvette sous une pression constante exercée par une masse de 2 kg. La perte de masse a été déterminée en calculant la différence par pesée des masses des échantillons avant et après le test.

- **Comportement hygroscopique** : Des éprouvettes cylindriques ont été utilisées pour cette analyse. Afin de garantir que l'adsorption et la désorption de vapeur d'eau ne se fassent que par une seule face, toutes les autres faces ont été scellées avec un ruban aluminium étanche. L'hygroscopicité a été évaluée à l'aide de tests d'adsorption et de désorption de vapeur d'eau, légèrement adaptés de la méthodologie proposée par (Lima et al., 2020). Les échantillons ont d'abord été stabilisés dans une chambre climatique à 23 °C et 50 % d'humidité relative (HR) jusqu'à atteindre une masse constante. Ensuite, la phase d'adsorption a débuté en augmentant l'HR à 75 %. Durant cette phase, les éprouvettes ont été pesées à 0 h, 1 h, 3 h, 6 h et 12 h. Après 12 heures, l'HR a été ramenée à 50 %, initiant la phase de désorption, également d'une durée de 12 heures (soit jusqu'à 24 h après le début du test). Les échantillons ont ensuite été pesés, clôturant le premier cycle. Un deuxième cycle a débuté immédiatement en rétablissant l'HR à 75 %, avec des mesures aux mêmes intervalles. Le test a été répété sur quatre cycles consécutifs.

- **Résistance à l'eau par l'érosion (goutte-à-goutte) et par immersion partielle** : La méthode d'essai utilisée pour évaluer la résistance des mortiers de terre crue à l'érosion par l'eau en conditions de goutte-à-goutte est adaptée du test de Geelong défini dans la norme néo-

zélandaise NZS 4298 :2024 (Standards New Zealand). Dans cette étude, des modifications ont été apportées pour tenir compte de l'épaisseur réduite des échantillons par rapport aux blocs prescrits dans la norme. L'objectif était de quantifier la perte de matériau sous l'action de l'eau de ruissellement. Le volume d'eau a été réduit proportionnellement à l'épaisseur des échantillons (20 mm), à 12 ml. Le temps de gouttage a été ajusté à 2,4–3,0 minutes, correspondant à un débit de 4 à 5 ml/min, soit le maximum autorisé par la norme NZS 4298 :2024 (Standards New Zealand). L'inclinaison des échantillons a été portée à environ 63° pour favoriser la perte de matière par ruissellement. Le test de l'immersion partielle a été réalisé en plaçant les échantillons dans de l'eau sur une hauteur d'environ 2mm et en observant le comportement de ceux-ci dans le temps.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Retrait linéaire durant le séchage et conductivité thermique.

1. **Retrait linéaire :** La Figure 1(a) présente le retrait linéaire (%) des différents types de mortiers en fonction du temps de séchage (1 mois, 2 mois, et plus de 3 mois). Les mortiers stabilisés montrent une évolution limitée du retrait après un mois. Le retrait des mortiers à base de chaux (CL et NHL) reste relativement faible dans le temps, atteignant $1,41 \pm 0,13$ % après 3 mois. Cette valeur est inférieure à celle du mortier de référence, qui atteint $1,82 \pm 0,19$ %. Après 3 mois, les mortiers à base de gypse (GYP) présentent des retraits plus importants, avec une moyenne de $2,26 \pm 0,11$ % pour 3GYP et $2,97 \pm 0,18$ % pour 6GYP. Le retrait est légèrement plus élevé pour les mortiers à base de chaux aérienne (CL) que pour ceux à la chaux hydraulique (NHL) à dosage équivalent. Ce résultat s'explique par le mécanisme de prise lent de la chaux aérienne basé uniquement sur la carbonatation. Ces observations confirment les résultats de (Santos et al., 2020), qui ont montré que la chaux aérienne augmente le retrait par rapport aux mortiers stabilisés à la chaux hydraulique. Le retrait croissant des mortiers stabilisés au gypse est attribué à la prise rapide du gypse hémihydraté qui crée une structure cristalline poreuse, sujette à la contraction durant le séchage. L'augmentation de la teneur en gypse accroît la quantité d'eau retenue, augmentant ainsi le retrait. (Ashour et al., 2023) ont montré qu'une stabilisation avec 5 % de gypse en masse peut entraîner un retrait linéaire de près de 3 % dans des blocs de terre comprimée. En résumé, le retrait linéaire reste inférieur à 2 % pour tous les mortiers, sauf ceux stabilisés au gypse. A titre de repère, La norme néo-zélandaise NZS 4298 :2024 (Standards New Zealand), fixe un retrait maximal de 3 % pour les mortiers non stabilisés et de 1 % pour les mortiers stabilisés au ciment. La norme (DIN 18946, (2018)), limite quant à elle le retrait linéaire à 3 % pour les mortiers armés de fibres, et à 2 % pour ceux non renforcés. Malgré les valeurs élevées observées pour les mortiers au gypse, les moyennes restent inférieures à 3 %, notamment pour la formulation à 3 % GYP.

2. **Conductivité thermique :** La Figure 1(b) présente la conductivité thermique du mortier de référence et des mortiers stabilisés en fonction du type et du pourcentage de stabilisant utilisé. Le mortier de référence, affiche la valeur la plus élevée de conductivité thermique, en moyenne $0,83$ W/(m·K). L'ajout de chaux aérienne (formulations 3CL, 6CL et 9CL) permet une réduction significative de la conductivité thermique, avec des valeurs comprises entre $0,50$ et $0,55$ W/(m·K). Les mortiers à base de chaux hydraulique naturelle (3NHL, 6NHL, 9NHL) présentent également une conductivité réduite, proche de $0,52$ – $0,55$ W/(m·K). L'effet de la teneur stabilisant (de 3 % à 9 %) n'a pas une influence significative sur la conductivité thermique, suggérant que l'amélioration thermique n'est pas proportionnelle à la quantité de chaux jusqu'à 9% en volume. En revanche, les mortiers stabilisés au gypse (3GYP et 6GYP)

affichent des valeurs plus élevées, atteignant respectivement environ 0,7 et 0,75 W/(m.K), proches de celle du mortier de référence. Ces résultats pourraient s'expliquer par la nature intrinsèque du gypse, qui tend à former une matrice cristalline plus dense. Ces résultats mettent en évidence que le type de stabilisant a un impact déterminant sur les propriétés thermiques des mortiers de terre. Les mortiers stabilisés à la chaux, qu'elle soit aérienne ou hydraulique, améliore la conductivité thermique, contrairement au mortier stabilisé gypse.

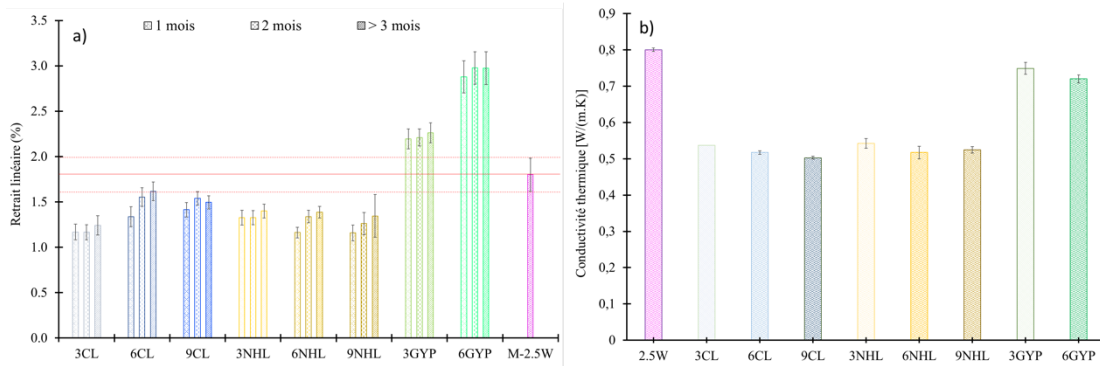


FIGURE 1. Évolution du retrait linéaire (%) du mortier de référence et des mortiers stabilisés à la chaux et au gypse au cours du temps (a), conductivité thermique des différents mortiers en fonction du type et du taux de stabilisant.

B. Résistance à la flexion et à la compression

La Figure 2(a) présente l'évolution de la résistance à la flexion des différentes formulations de mortiers au cours du temps. Les mortiers stabilisés à la chaux aérienne (CL) présentent des résistances très faibles, variant de $0,10 \pm 0,01$ MPa (6CL) à $0,16 \pm 0,04$ MPa (3CL et 9CL), tandis que ceux à base de chaux hydraulique naturelle (NHL) affichent des valeurs semblables : $0,13 \pm 0,01$ MPa pour 3NHL et 6NHL, et $0,16 \pm 0,01$ MPa pour 9NHL. En revanche, le mortier de référence M-2.5W atteint $1,24 \pm 0,03$ MPa, et les formulations stabilisées au gypse ont montré de meilleure résistance avec $1,51 \pm 0,11$ MPa pour 3GYP et $1,3 \pm 0,6$ MPa pour 6GYP. Cette disparité est principalement due à la nature des interactions physico-chimiques entre les liants et les particules d'argile : à faibles quantités, la chaux neutralise les charges de surface des argiles, induisant une floculation colloïdale comme l'expliquent (Cabane, 2004; Diamond et Kinter). Les données de la Figure 2(b) sur la résistance à la compression confirment cette tendance. Les mortiers à base de chaux, quelle que soit leur formulation ou la durée de cure, restent très peu résistants (entre 0,4 et 1 MPa), en raison de la prise lente du liant par carbonatation, insuffisamment activée aux dosages testés (jusqu'à 9 %). En revanche, les mortiers au gypse se distinguent par une montée rapide et significative en résistance, dépassant 4 MPa après 28 jours, avec un maximum observé à 4,5 MPa pour 3GYP. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par (Rocha et al., 2025), qui montrent qu'une incorporation de 20 % de gypse dans des mortiers de terre peut augmenter la résistance à la compression de 320 %, corroborant également les conclusions de (Santos et al., 2024). Le mortier de référence, avec $3,64 \pm 0,31$ MPa, reste inférieur à 3GYP. Les meilleures performances des mortiers au gypse s'expliquent par la prise rapide du gypse α -hémihydraté, qui cristallise rapidement en gypse dihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), créant un réseau cohésif dès les premières heures. Toutefois, cette cristallisation rapide s'accompagne d'un retrait significatif, susceptible d'engendrer des microfissures, ce qui pourrait expliquer les écarts types plus élevés observés pour les formulations au gypse. Ces microfissures proviendraient des contraintes différentielles entre les cristaux rigides formés et la matrice argileuse, plus souple, entraînant des déformations

internes hétérogènes. Dans l'ensemble, le mortier de référence et les mortiers au gypse dépassent les seuils minimaux définis par la classe S-II de la norme (DIN 18946, (2018)), (résistance à la compression $\geq 1,5$ MPa, résistance à la flexion $\geq 0,7$ MPa).

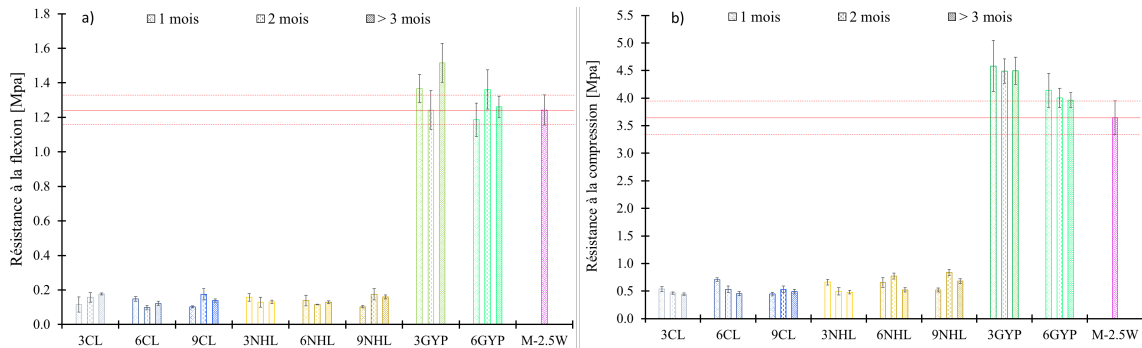


FIGURE 2. Évolution des résistances en flexion (a) et en compression (b) du mortier de référence et des mortiers stabilisés à la chaux et au gypse au cours du temps (1, 2 et plus de 3 mois).

C. Comportement hygroscopique

Le comportement hygroscopique a été étudié sur quatre cycles successifs d'adsorption/désorption de vapeur d'eau à 23 °C, 50 % / 75 % HR. La Figure 4(a) montre les courbes caractéristiques en cloche des échanges hygrométriques réversibles. Le mortier de référence M-2.5W présente de fortes variations de masse à chaque cycle, ce qui confirme sa grande capacité à absorber et restituer l'humidité (une propriété bien connue des enduits de terre crue (Giada et al., 2019; Liuzzi et al., 2018; Palumbo et al., 2016; Randazzo et al., 2016)). Les mortiers stabilisés à la chaux (CL et NHL) montrent des amplitudes légèrement plus faibles, témoignant d'une capacité d'échange réduite, mais restant très proche de celle du mortier de référence. Les mortiers stabilisés au gypse (3GYP et 6GYP) par contre conservent une réponse hygroscopique quasi similaire à celle du mortier de référence.

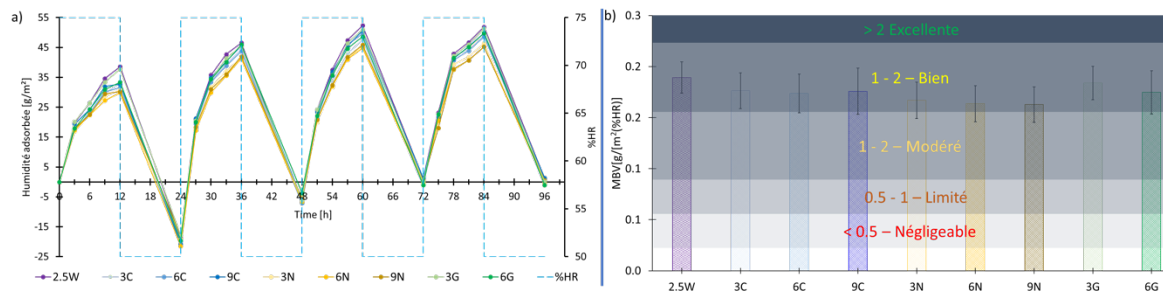


FIGURE 4. Cycles d'adsorption-désorption de vapeur d'eau des mortiers de référence et stabilisés (a), et valeur tampon d'humidité (MBV) des mortiers de référence et stabilisés classés selon la classification NORDTEST.

En ce qui concerne la valeur du tampon d'humidité (MBV), les résultats présentés à la figure 4(b) montrent que toutes les formulations sont classées comme ayant un comportement modéré selon le protocole NORDTEST (Rode et al., 2005). ces résultats sont en avec ceux de (Ouedraogo et al., 2020) et de Santos et al (Santos et al., 2024) qui ont montré que les pourcentages de stabilisation réduit n'affectent pas les propriétés hygroscopique des mortiers.

D. Résistance à l'abrasion à sec

La perte de masse due à l'abrasion (Figure 3 (a)) révèle que le mortier de référence M-2.5W perd très peu de matière : $0,18 \pm 0,01$ g, signe d'une bonne cohésion en surface. Les mortiers stabilisés au gypse (3GYP et 6GYP) montrent également de bonnes performances avec des pertes de $0,18 \pm 0,02$ g et $0,12 \pm 0,012$ g respectivement, conformes à la classe SII de la norme (DIN 18946, (2018)), (limite $\leq 0,7$ g). En revanche, les mortiers à la chaux aérienne (CL90) présentent des pertes élevées, dépassant $0,79$ g pour 6CL et jusqu'à $1,94$ g pour 9CL. Au-delà de la limite de la classe SII. Les mortiers à la NHL montrent eux aussi des pertes importantes, mais celles-ci diminuent avec l'augmentation de la teneur en liant : de $1,33 \pm 0,4$ g pour 3NHL à $0,25 \pm 0,1$ g pour 9NHL, ce dernier étant classé comme très résistant selon la classe SI de la norme (DIN 18946, (2018)). Ces résultats sont cohérents avec les performances mécaniques et les observations de surface (Figure 3 (b)).

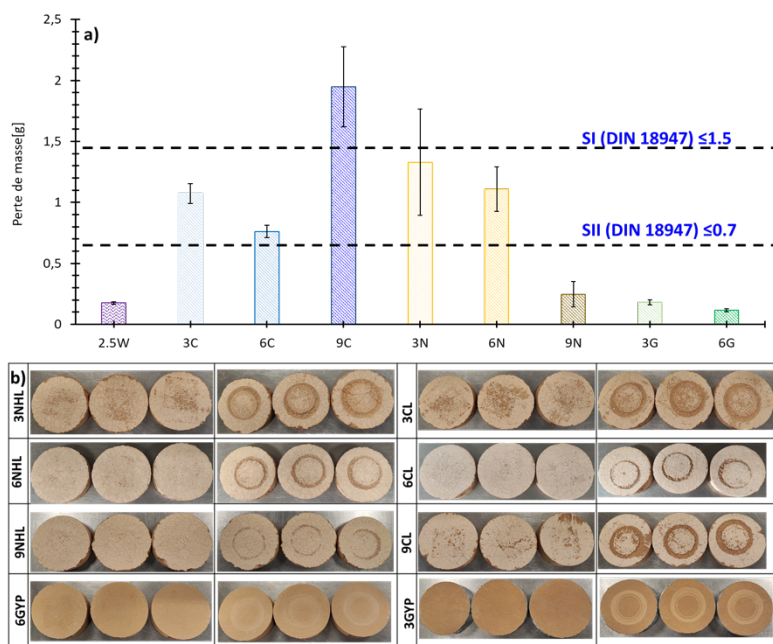


FIGURE 3. Perte de masse par abrasion du mortier de référence et des mortiers stabilisés à la chaux et au gypse après 3 mois (a) et aspect des surfaces des éprouvettes après l'essai d'abrasion (b).

E. Perte de masse par érosion hydrique

Après les tests d'abrasion, les éprouvettes ont été nettoyées avec une brosse douce, puis soumises à un test d'érosion par goutte-à-goutte. Les valeurs de perte de masse ont été calculées sur la base de trois éprouvettes séchées jusqu'à masse constante. La Figure 5(b) montre une dégradation plus marquée pour le mortier de référence que pour tous les mortiers stabilisés. Cela pourrait s'expliquer par la structure des argiles (feuilletés cristallins empilés) qui absorbent rapidement l'eau, ce qui provoque un gonflement, une séparation des feuilletés suivie d'une perte de cohésion (Chen et al., 2022). La trace observée sur les échantillons contenant du gypse (ex. : 3GYP sur figure 5(b)), est due à la dissolution du gypse au contact de l'eau (Abdolvand et Sadeghiamirshahidi, 2024; Yilmaz, 2001). Toutefois, cette interprétation reste indicative compte tenu de la faible solubilité du matériau et de la courte durée du test (3min). Une perte de masse de $0,5 \pm 0,1$ g a été enregistrée pour les mortiers au gypse, légèrement supérieure aux autres stabilisés ($< 0,3 \pm 0,02$ g), mais bien inférieure au mortier de référence ($1,3 \pm 0,15$ g) Figure 5(a). Ces résultats

sont cohérents avec la littérature (Gomes et al., 2016; Ouedraogo et al., 2020; Ranesi, 2023; Stathopoulos et al., 2021).

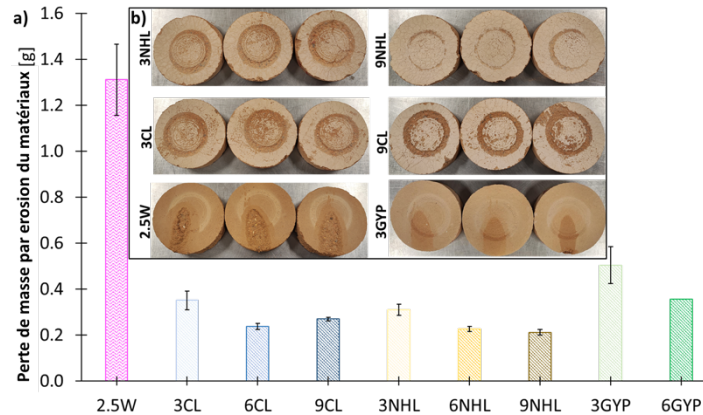


FIGURE 5. Perte de masse des mortiers de référence et stabilisés après l'essai d'érosion à l'eau selon une adaptation du protocole NZS 4298:2024 (a), et aspect visuel des surfaces des échantillons de mortier après l'essai d'érosion (b).

F. Perte de masse par érosion à l'eau

La figure 6 montre l'évolution des mortiers de terre après immersion partielle dans l'eau pendant 1 minute (a) puis 24 heures (b). Après 1 minute, tous les mortiers stabilisés restent globalement secs en surface, avec une légère remontée capillaire sur quelques millimètres et sans signes apparents de dégradation. En revanche, le mortier de référence (2.5 W) présente déjà un début d'effritement à la base, avec un relâchement de particules fines dans la coupelle, révélant sa faible cohésion et sa vulnérabilité immédiate à l'eau. Après 24 heures, tous les mortiers, y compris les stabilisés, présentent des dégradations à des degrés divers. Le mortier de référence est le plus altéré, avec un dépôt important de matière dans la coupelle. Les mortiers à la chaux aérienne et au gypse conservent une certaine cohésion, mais montrent respectivement des fissurations marquées et un ramollissement généralisé. Les formulations à 3 % et 6 % de chaux hydraulique naturelle se comportent de manière similaire à celles à la chaux aérienne. En revanche, les mortiers à 9 % de chaux hydraulique présentent une stabilité remarquable : aucune dégradation visible, bien que totalement saturés par capillarité. Cela montre que dès 9% de stabilisation la chaux hydraulique naturelle permet d'assurer une durabilité à l'eau des mortiers jusqu'à 24h.

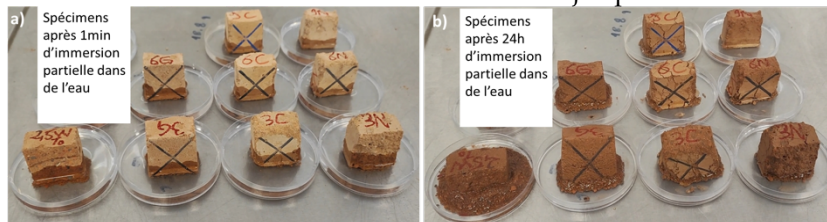


FIGURE 6. Comportement des mortiers de terre de référence et stabilisés après immersion partielle dans l'eau: comparaison après 1-minute (a) et 24 heures (b)

IV. CONCLUSION

Cette étude a mis en évidence l'influence de faible quantité de différents liants minéraux (à savoir la chaux hydraulique naturelle (NHL 3.5), la chaux aérienne (CL90) et le gypse α -hémihydraté)

sur les performances des mortiers de terre. À faibles dosages, leurs effets varient significativement en fonction des propriétés étudiées. La NHL et la CL90, même en petites quantités, se révèlent particulièrement efficaces pour limiter le retrait linéaire de séchage. De plus, une teneur de 9 % en NHL a permis d'améliorer la durabilité face à l'abrasion, à l'érosion hydrique et l'immersion à eau. En revanche, la chaux aérienne et la chaux hydraulique se sont avérées moins favorables sur le plan des résistances en compression et en flexion. Le gypse, quant à lui, a nettement amélioré les performances mécaniques, en particulier la résistance à la compression et à la flexion, grâce à sa capacité de prise rapide. Toutefois, il induit également un retrait plus important et une grande sensibilité à la dissolution en présence d'eau. Comparer au mortier de référence, de faible quantité de stabilisant n'ont pas eu une influence significative sur les performances hygrosopiques.

Ces résultats soulignent la nécessité de trouver un équilibre entre performances mécaniques, durabilité, hygrothermique, maîtrise du retrait et compatibilité environnementale dans la conception des enduits en terre. La stabilisation permet d'améliorer certaines propriétés critiques, mais n'est pas universellement bénéfique selon tous les critères, notamment à faibles dosages. L'efficacité d'un stabilisant dépend donc non seulement de sa nature chimique, mais aussi de ses interactions avec la matrice argileuse et des conditions environnementales. Des investigations complémentaires, incluant des tests de capillarité, l'influence du pH et des analyses microstructurales (DRX/ATG/MEB) sont en cours. Ces analyses permettront d'identifier les phases formées (carbonates, gypse dihydraté), de relier la microstructure aux propriétés mécaniques et hydriques, et enfin de mieux discriminer les mécanismes (floculation, carbonatation, pouzzolanie).

Remerciements : Cette recherche a été rendue possible grâce au programme de co-tutelle de doctorat EUTOPIA, que je remercie pour son soutien. Je tiens également à remercier Tânia Santos pour son assistance technique et son accompagnement durant les travaux expérimentaux.

V. REFERENCES

- Abdolvand, Y., Sadeghiamirshahidi, M., 2024. Soil stabilization with gypsum: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 16, 5278–5296. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.02.007>
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., Alcover, J.-F., 2010. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. *Applied Clay Science* 50, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.07.023>
- Ashour, T., Korjenic, A., Abdelfattah, A., Sesto, E., Wu, W., 2023. Shrinkage Behavior of Stabilized Earth Bricks Reinforced with Wheat and Barley Straw. *Sustainability* 15, 16254. <https://doi.org/10.3390/su152316254>
- Cabane, N., 2004. Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation (phdthesis). Université Jean Monnet - Saint-Etienne.
- Chen, W.L., Grabowski, R.C., Goel, S., 2022. Clay Swelling: Role of Cations in Stabilizing/Destabilizing Mechanisms. *ACS Omega* 7, 3185–3191. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04384>
- Diamond, S., Kinter, E.B., n.d. Mechanisms of Soil-Lime Stabilization.
- DIN 18946, Earth masonry mortar - Requirements, test and labelling, 2018.
- 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.

- Giada, G., Caponetto, R., Nocera, F., 2019. Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review. *Sustainability* 11, 5342. <https://doi.org/10.3390/su11195342>
- Gomes, M.I., Diaz Gonçalves, T., Faria, P., 2012. Earth-based repair mortars: experimental analysis with different binders and natural fibers.
- Gomes, M.I., Gonçalves, T.D., Faria, P., 2016. Hydric Behavior of Earth Materials and the Effects of Their Stabilization with Cement or Lime: Study on Repair Mortars for Historical Rammed Earth Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering* 28, 04016041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001536](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001536)
- Lima, J., Faria, P., Santos Silva, A., 2020. Earth Plasters: The Influence of Clay Mineralogy in the Plasters' Properties. *International Journal of Architectural Heritage* 14, 948–963. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1727064>
- Liuzzi, S., Hall, M.R., Stefanizzi, P., Casey, S.P., 2013. Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. *Building and Environment* 61, 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.006>
- Liuzzi, S., Rubino, C., Stefanizzi, P., Petrella, A., Boghetich, A., Casavola, C., Pappalettera, G., 2018. Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers. *Construction and Building Materials* 158, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.013>
- Maubec, N., Deneele, D., Ouvrard, G., 2017. Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material. *Applied Clay Science* 137, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.11.033>
- Ouedraogo, K.A.J., Aubert, J.-E., Tribout, C., Escadeillas, G., 2020. Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials* 236, 117578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>
- Palumbo, M., McGregor, F., Heath, A., Walker, P., 2016. The influence of two crop by-products on the hygrothermal properties of earth plasters. *Building and Environment* 105, 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.004>
- Randazzo, L., Montana, G., Hein, A., Castiglia, A., Rodonò, G., Donato, D.I., 2016. Moisture absorption, thermal conductivity and noise mitigation of clay based plasters: The influence of mineralogical and textural characteristics. *Applied Clay Science* 132–133, 498–507. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.021>
- Ranesi, A., 2023. Eco-efficient Plasters for Increased Indoor Air Quality and Comfort (doctoralThesis).
- Rocha, D., Faria, P., Lucas, S.S., 2025. Clay-gypsum mortars: The influence of binder and sand ratios. *Results in Engineering* 26, 104702. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104702>
- Rode, C., Peuhkuri, R., Time, B., Svennberg, K., Ojanen, T., 2005. Moisture Buffer Value of Building Materials. *Journal of ASTM International* 4, 1–12. <https://doi.org/10.1520/JAI100369>
- Santos, T., Gomes, M.I., Silva, A.S., Ferraz, E., Faria, P., 2020. Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based plasters. *Construction and Building Materials* 254, 119222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119222>
- Santos, T., Luijten, N.W., Santos Silva, A., Silvestre, J.D., Faria, P., 2024. Earthen plasters hygrothermal and mechanical performance: Effect of adding recycled gypsum from plasterboards and raw hemihydrate. *Journal of Building Engineering* 98, 111407. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111407>
- Santos, T., Nunes, L., Faria, P., 2017. Production of eco-efficient earth-based plasters: Influence of composition on physical performance and bio-susceptibility. *Journal of Cleaner Production* 167, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.131>
- Standards New Zealand [WWW Document], n.d. URL <https://www.standards.govt.nz/shop/NZS-42982024> (accessed 6.29.25).
- Stathopoulos, K., Apostolopoulou, M., Bakolas, A., 2021. Enhancement of water resistance of earthen mortars through stabilization. *Construction and Building Materials* 289, 123180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123180>
- Yılmaz, I., 2001. Gypsum/anhydrite: some engineering problems. *Bull Eng Geol Environ* 60, 227–230. <https://doi.org/10.1007/s100640000071>