

EFFET DE LA SATURATION ET DU CHARGEMENT SUR LE COMPORTEMENT AU GEL-DÉGEL D'UN MATÉRIAU TERRE

EFFECT OF SATURATION AND LOADING ON FREEZING-THAWING BEHAVIOR OF AN EARTHEN MATERIAL

Lassana Bakary TRAORE^{1,2}, Antonin FABBRI¹, Fabrice ROJAT², Fionn MCGREGOR³

¹ Université de Lyon, ENTPE, LTDS, Vaulx-En-Velin, France

² CEREMA Centre-Est/DTerCE/DRIM/RN, Bron, France

³ Université de Pau et des Pays de l'Adour, UPPA, SIAME, Anglet, France

RÉSUMÉ – Cette étude propose d'évaluer l'effet de la saturation liquide et du chargement axial sur les déformations au gel-dégel d'un matériau terre non-saturé. Des contraintes axiales de 0 et de 100 kPa ont été appliquées sur des échantillons conditionnés à trois saturations liquides initiales différentes. Les résultats montrent que le chargement mécanique accentue significativement les déformations résiduelles dues au gel-dégel.

ABSTRACT – This study proposes to investigate the effect of liquid saturation and axial loading on freezing-thawing deformations of an unsaturated earthen material. Axial stresses of 0 and 100 kPa were applied on samples conditioned at three different initial liquid saturations. The results show that mechanical loading emphasizes significantly residual deformations due to freezing and thawing.

1. Introduction

L'utilisation de la terre comme matériau de construction connaît un fort regain d'intérêt en raison de sa faible énergie grise et de ses performances hygrothermiques. Les murs en terre crue peuvent contribuer à la régulation de l'humidité et de la température à l'intérieur de l'habitat (McGregor et al. 2014). Également, les murs offrent une capacité de portance mécanique suffisantes pour des constructions d'habitats. Cependant, ses performances mécaniques varient avec sa teneur en eau (Bui et al. 2014), (Champiré et al. 2016). Dans des conditions humides importantes, la résistance mécanique et le module d'élasticité sont fortement réduites, ce qui met en péril la stabilité de la structure.

De plus, une combinaison de l'attaque humide et du gel-dégel peut induire une forte augmentation de la teneur en eau ainsi que de sévères dégradations comme l'écaillage et la fissuration (Traoré et al. 2021). Ce résultat est illustré dans une étude conduite dans la région Auvergne-Rhône-Alpes par (Scarato and Jeannet 2015) qui ont observé que l'endommagement au gel se produit majoritairement au niveau du soubassement avec des teneurs en eau proches de la saturation totale. Aussi, comme les contraintes axiales sont maximales dans cette zone basse du mur, un couplage entre la chute de résistance due à la saturation liquide, l'endommagement dû au gel et le chargement mécanique peut être à l'origine des effondrements des murs en terre observés au dégel. Cependant cette vision reste qualitative, et il n'existe pas aujourd'hui d'essais faisant consensus pour évaluer la résistance au gel-dégel des murs en terre. Certes, quelques méthodes expérimentales basées sur la norme ASTM D560 (ASTM International 2016) ont été proposées. Il s'agit entre autres de protocoles d'inspections visuelles, de mesures de perte de masses par écaillage, de prise de masse par humidification et de résistance à la compression après un certain nombre de cycles de gel-dégel (Netinger et al. 2014) (Narloch and Woyciechowski 2020). Bien que ces études donnent une quantification de l'endommagement au gel-dégel, elles ne précisent pas les mécanismes et les conditions conduisant à cet endommagement.

Ainsi, ce travail a pour objectif d'étudier le comportement au gel-dégel du matériau terre sous chargement mécanique. Un dispositif a été développé pour exercer des contraintes axiales de 0 et de 100 kPa sur des échantillons cylindriques afin de reproduire l'effet de la charge mécanique sur le mur en terre. Deux niveaux d'humidité ont été étudiés expérimentalement. Des échantillons de terre ont été équilibrés à une humidité relative de 95% (RH95) pour reproduire l'état d'humidité normale d'une structure en terre. Des saturations liquide initiales de 75% (S75) et 85% (S85) ont été choisies pour étudier le cas pathologique (cas où la teneur en eau est importante). Le comportement au gel-dégel des sols compactés est évalué par la mesure de la déformation axiale au cours de 12 cycles de gel-dégel entre +10 °C et -20 °C.

2. Matériels et méthodes

2.1. Caractéristiques du matériau terre

L'étude est effectuée sur le tamisât à 2 mm d'un sol issu d'une ancienne construction en terre crue dans la commune de Dagneux en région Auvergne-Rhône-Alpes. La terre tamisée est composée de 18% d'argiles (particules de taille inférieure à 0.002 mm), de 52% de limons (particules de taille comprise entre 0.002 et 0.063 mm) et 30% de sables (particules de taille entre 0.063 mm et 2 mm) avec une masse volumique des grains égale à $2.67 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. La valeur au bleu est de 1.18 et la diffraction au rayons X sur la fraction 0/80 μm indique entre autres une présence de quartz (44%), d'argiles gonflantes (17%), de kaolinite (9%), d'Illites (8%) et des traces de chlorites (1%).

2.2. Préparation des échantillons

Des échantillons cylindriques de 35 mm de diamètre et de 70 mm d'hauteur ont été fabriquées par double compaction aux caractéristiques de l'Optimum Proctor Modifié (OPM) de la terre avec une teneur en eau (ω_{OPM}) égale à 14% et une masse volumique apparente sèche (ρ_{OPM}) égale à 1850 kg/m^3 . Les échantillons compactés présentent initialement un degré de saturation liquide (rapport entre le volume d'eau liquide et le volume des vides) proche de 85%. Pour étudier l'influence de la saturation liquide sur le comportement au gel-dégel, quatre méthodes de cure humide ont été employées. Ces méthodes sont présentées dans le tableau 1.

Tableau.1 : Conditions de cure des échantillons

Notation	Méthode de conditionnement des échantillons
S0	Séchage par étuvage à $T=105\pm5^\circ\text{C}$
HR95	Stockage dans une boîte maintenue à $\text{HR}=95\pm2\%$
S75	Séchage dans une ambiance normale jusqu'à $S=75\%$
S85	Conservation immédiate après fabrication à l'OPM

Des échantillons (S0) sont séchés par étuvage à une température $T=105\pm5^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. Ils sont utilisés pour quantifier les déformations thermiques dues à la variation de température lors des cycles. D'une part, cinq autres échantillons (HR95) sont maintenus à une humidité relative $\text{HR}=95\pm2\%$ et une température $T=20\pm2^\circ\text{C}$ dans une boîte hermétique contenant une solution saline KNO_3 . En effet, une humidité relative de 95% est choisie pour reproduire les conditions d'humidités constatées en hiver dans la région. Également, un essai de sorption à la vapeur d'eau a montré qu'une humidité relative $\text{HR}=95\%$ conduisait à un degré de saturation liquide $S=30\%$ environ pour le matériau étudié. D'autre part, les situations de teneurs en eaux pathologiques sont étudiées via des échantillons équilibrés à des saturations liquides de 75% (S75) et de 85% (S85).

Pour les échantillons S75, le séchage est effectué jusqu'à atteindre la masse correspondant m_f à la saturation liquide $S=75\%$ estimée avec l'eq 1.

$$m_f = m_s(1 + S \cdot \omega_{sat}) \quad (1)$$

Avec m_s la masse sèche de l'échantillon et ω_{sat} la teneur en eau maximale (pour $S=100\%$)

$$m_s = \frac{m_{opm}}{1 + \omega_{opm}} \quad (2)$$

Où m_{opm} et ω_{opm} sont respectivement la masse et la teneur en eau initiales de l'échantillon (mesurées après fabrication).

$$\omega_{sat} = \rho_L \left(\frac{1}{\rho_{opm}} - \frac{1}{\rho_s} \right) \quad (3)$$

ρ_L représente la masse volumique de l'eau liquide ($\rho_L = 998 \text{ kg/m}^3$) et ρ_{opm} la masse volumique sèche du matériau compacté à l'OPM ($\rho_{opm} = 1850 \text{ kg/m}^3$). ρ_s est la masse volumique des grains du sol obtenue au pycnomètre ($\rho_s = 2670 \text{ kg/m}^3$).

Après la période de cure, chaque échantillon est immédiatement enveloppé dans un film plastique hermétique pour éviter toute variation d'eau lors de l'essai. Afin d'assurer une bonne homogénéisation hydrique, les échantillons sont conservés dans une chambre régulée à une température $T=22\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant au moins trois jours avant l'essai de gel-dégel.

2.3. Protocole expérimental

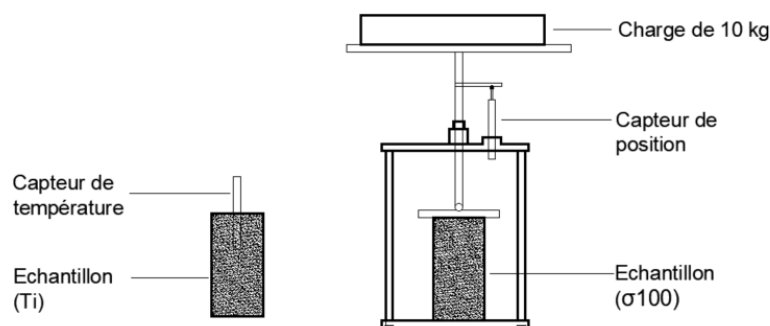


Figure 1. Dispositif d'essai de gel-dégel sous charge constante

La figure 1 montre le dispositif expérimental développé pour effectuer des cycles de gel-dégel sous chargement mécanique. Le déplacement axial des échantillons est mesuré par un capteur de position LVDT connecté à une centrale d'acquisition CR1000. Pour chaque saturation étudiée, une sonde de température est insérée au centre d'un échantillon (noté Ti) permettant d'obtenir le profil de température interne. Une charge métallique de 10 kg est placée sur le plateau du dispositif pour reproduire une contrainte axiale de 100 kPa sur les échantillons (σ_{100}). Dans le cas où aucune charge n'est appliquée sur l'échantillon, ce dernier porte la mention σ_0 .

L'essai de gel-dégel est réalisé dans une enceinte climatique à température et hygrométrie contrôlées. Initialement, une température de $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ est maintenue pendant 4 heures. Ensuite, une descente en température est réalisée en 2 heures pour atteindre une température de gel de $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. Un palier de 4 heures de gel est réalisée à $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ avant une remontée en température en 2 heures jusqu'à la température de dégel à $+10 \text{ }^\circ\text{C}$. Durant le

palier à +10 °C, une humidité relative de 20% est également imposée dans l'enceinte pour éviter toute condensation et solidification de la vapeur d'eau sur le dispositif pouvant bloquer le déplacement du piston lors de l'essai. 12 cycles de gel-dégel sont réalisés durant lesquels les mesures de température (enceinte et échantillons) et déplacement axial sont enregistrés toutes les 10 secondes.

Durant l'essai, les variations de température induisent aussi des contractions et dilatations thermiques du dispositif. Ces déplacements thermiques doivent être prises en compte dans la mesure des déplacements afin de déterminer précisément la déformation axiale des échantillons. Pour cela, le bâti est étalonné grâce à un cylindre en Invar® de mêmes dimensions que les échantillons en terre. L'alliage en Invar® présente un coefficient de dilatation thermique d'une valeur de l'ordre de $2.10^{-6} K^{-1}$ qui correspond au dixième de celle des métaux composant le dispositif (acier, aluminium) et de la terre. Ainsi, cet étalonnage permet de déterminer le déplacement thermique du dispositif ΔL_{th} en fonction de la température de l'enceinte climatique T_e . Finalement, la déformation axiale ε de l'échantillon à une température donnée T_e est calculée comme suit :

$$\varepsilon(T_e) = \frac{\Delta L(T_e) - \Delta L_{th}(T_e)}{L_0} \quad (4)$$

Avec ε la déformation axiale, ΔL le déplacement global mesuré par le capteur de déplacement, ΔL_{th} le déplacement thermique du dispositif, L_0 la hauteur initiale de l'échantillon et T_e la température de l'enceinte climatique.

3. Résultats et discussions

3.1. Effet de la saturation liquide initiale

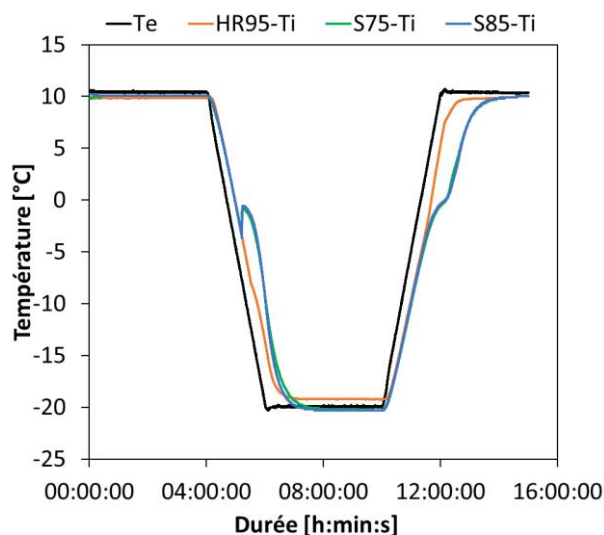


Figure 2. Profil de températures pour N=1

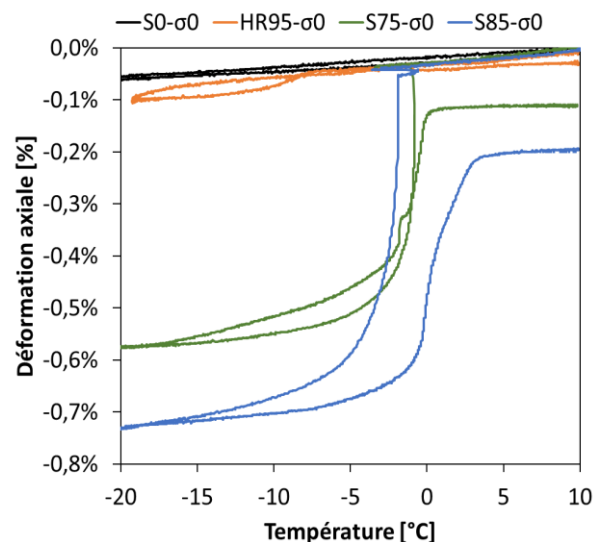


Figure 3. Profil de déformations pour N=1

Les profils de température pour chaque degré de saturation liquide étudié sont présentés dans la figure 2. En raison de l'inertie thermique du matériau, les résultats montrent un écart entre la température de l'enceinte (T_e) et les températures internes des échantillons (T_i) lors des variations de température. Toutefois, les paliers de 4 h à température constante (+10 °C et -20 °C) est suffisant pour atteindre l'équilibre thermique.

Pour les échantillons S75-Ti et S85-Ti, deux phénomènes particuliers s'observent durant les variations de température. D'une part, lors de la descente en température, l'eau reste à

l'état liquide jusqu'à près de -3 °C : on dit que le liquide est dans un état de surfusion. Ensuite, on observe un pic de température (remontée jusqu'à 0 °C) due à la dissipation de chaleur latente associée à la formation instantanée de glace (réaction exothermique). D'autre part, un plateau de température à 0 °C apparaît lors de la phase de remontée en température. Ce deuxième phénomène correspond à l'absorption de chaleur nécessaire pour la fusion de la glace (réaction endothermique). Ces phénomènes propres au changement de phase de l'eau interstitielle interviennent significativement pour les teneurs en eau considérées pathologiques ($S > 75\%$). Dans les conditions normales d'humidité ($HR < 95\%$), aucun de ces phénomènes de changement de phase ne se produit, ce qui pourra justifier que le gel n'intervient pas, ou peu, pour des humidités relatives inférieures à 95%.

La figure 3 montre les déformations axiales des échantillons non-chargés (σ_0) au cours du premier cycle de gel-dégel. Pour les échantillons secs, les résultats indiquent un retrait thermique d'environ 0.08% pour une variation de température de +10 °C à -20 °C. Cela permet d'estimer un coefficient de dilatation thermique $\alpha_{th} = (2.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-5} K^{-1}$ pour le matériau terre étudié. On observe que les déformations des échantillons équilibrés à $HR = 95\%$ sont de la même amplitude des déformations thermiques. Ainsi, ce résultat confirme l'absence d'endommagement dans le cas des conditions normales d'humidité d'un mur en terre crue comme il a été constaté dans (Aubert and Gasc-Barbier 2012).

Pour les saturations liquides importantes (S75 et S85), la figure 3 montre des déformations significatives pouvant être associées au gel-dégel. Les échantillons présentent initialement une forte contraction au début du gel (entre -3 et -5 °C). Cette contraction se poursuit progressivement jusqu'à 0.6% et 0.7% pour S75 et S85 respectivement. On peut remarquer que le retrait au gel augmente avec la saturation liquide. Ce retrait au gel a aussi été observé dans des études expérimentales du gel des sols non-saturés (Hamilton 1966), (Konrad 1989), (Dagesse 2010). Ce mécanisme de retrait au gel peut être expliquée par le phénomène de cryosuccion. En effet, la glace se forme initialement dans les pores les plus larges (pores non-saturés) et lors de la descente en température, le front de gel se propage vers les pores de taille décroissante. Sachant que le potentiel chimique de la glace est inférieur à celle de l'eau liquide, un gradient de pression appelé potentiel de cryosuccion ou succion cryogénique est généré. De ce fait, un transport d'eau liquide des petits pores (pores non-gelés) vers les pores les plus larges (pores gelés) se produit. Ce phénomène provoque alors une diminution de la quantité d'eau au sein des argiles de la matrice solide ce qui induit un retrait. Lors du dégel, le gradient de pression diminue et l'eau liquide dégelée peut retourner dans les pores initialement désaturés lors du gel. Ainsi, le remouillage des particules d'argiles engendre un gonflement des échantillons. Néanmoins, après un cycle complet de gel-dégel, on remarque que les échantillons S75 et S85 présentent des déformations irréversibles.

Dans la suite, l'étude de l'impact du chargement mécanique sur les déformations au gel-dégel portera sur les échantillons gelables (S75 et S85).

3.2. Effet du chargement mécanique sur les déformations au gel-dégel

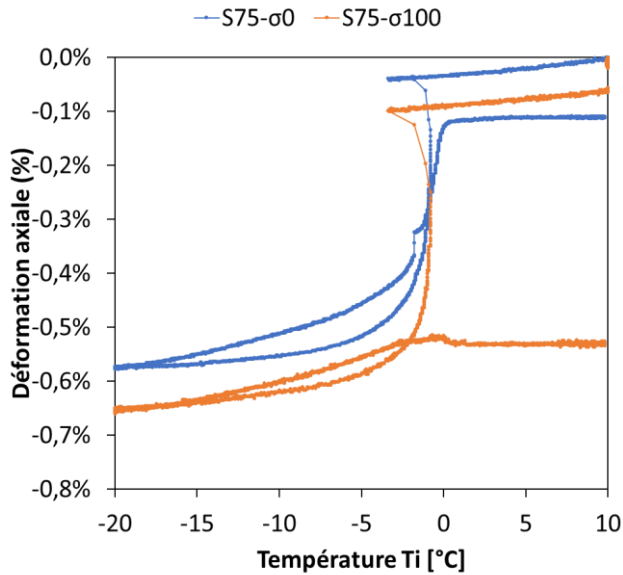


Figure 4. Impact de la contrainte axiale sur les déformations pour N=1 et S=75%

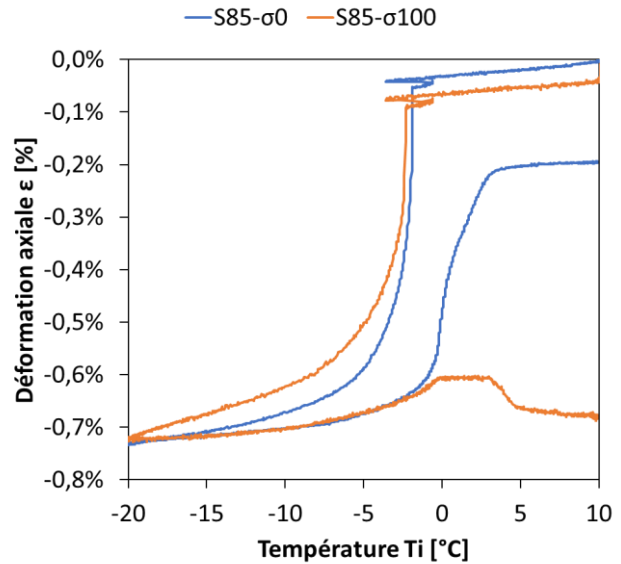


Figure 5. Impact de la contrainte axiale sur les déformations pour N=1 et S=85%

Les figures 4 et 5 illustrent l'influence de la contrainte axiale de 100 kPa sur les déformations au premier cycle de gel-dégel pour les échantillons saturés à S=75% et S=85% respectivement. Pour une même saturation liquide, les résultats montrent que la contrainte axiale de 100 kPa n'accentue pas significativement le retrait au gel. Le chargement mécanique provoque une limitation significative du gonflement au dégel lorsque la température est proche de la température de fusion (0 °C). Par conséquent, après un cycle complet, les échantillons sous-charge axiale présentent une déformation résiduelle plus importante. La déformation résiduelle ε_{res} se définit comme :

$$\varepsilon_{res} = \varepsilon_f - \varepsilon_i \quad (5)$$

ε_i et ε_f sont respectivement les déformations au début et à la fin du cycle considéré

3.3. Effet des sollicitations cycliques sur les déformations au gel-dégel

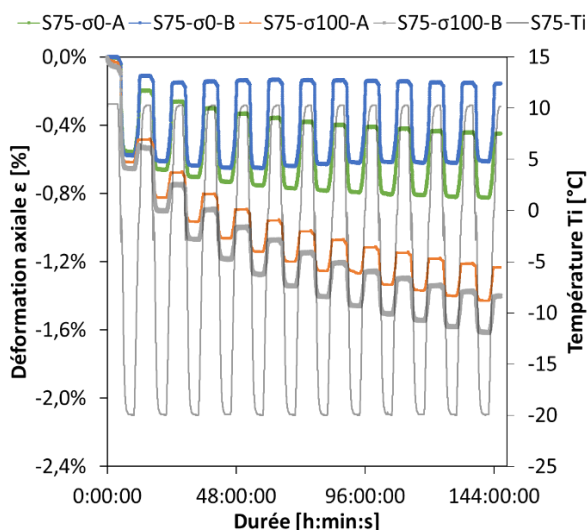


Figure 6. Evolution des déformations avec les cycles de gel-dégel pour S=75%

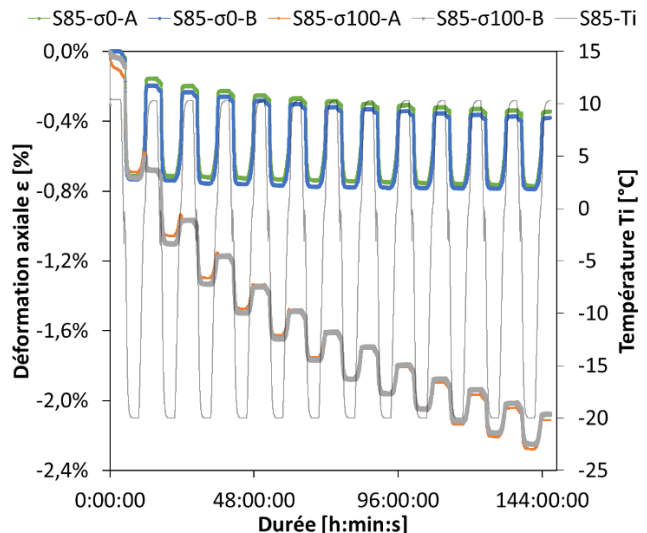


Figure 7. Evolution des déformations avec les cycles de gel-dégel pour S=85%

Les figures 6 et 7 montrent l'évolution des déformations pour les 12 cycles de gel-dégel pour $S=75\%$ et $S=85\%$ respectivement. On observe que la contrainte axiale de 100 kPa accentue significativement le retrait global au fur et à mesure des cycles. Ce phénomène de retrait est davantage marqué lorsque la saturation liquide est importante.

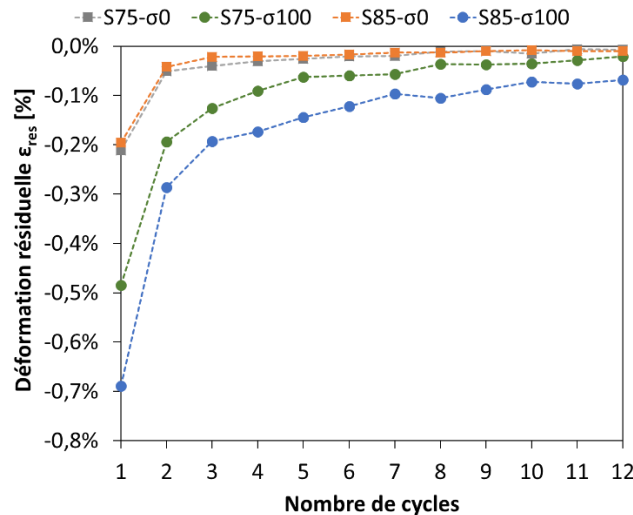


Figure 8. Evolution des déformations résiduelles générées lors d'un cycle de gel-dégel avec le nombre de cycles

La figure 8 présente le calcul des déformations résiduelles (suivant l'eq.5) à chaque cycle de gel-dégel pour les quatre configurations S75-σ0, S75-σ100, S85-σ0 et S85-σ100. Les résultats montrent que l'impact de la contrainte axiale est significatif lors des premiers cycles. Pour une saturation donnée, la différence de déformations résiduelles tend à disparaître dès le 8^{ème} cycle. Ce résultat confirme bien que l'endommagement au gel-dégel intervient principalement lors des premiers cycles de gel-dégel. En effet, lors des premiers cycles, la structure poreuse peut subir une importante restructuration due au gel-dégel et à la contrainte axiale, ce qui induit une déformation résiduelle. Ensuite, cette restructuration progressive permet au matériau de s'accommoder aux sollicitations (gel-dégel et chargement mécanique) avec de moins en moins d'endommagement supplémentaire d'où une réduction de déformations résiduelles avec le nombre de cycles.

4. Conclusions

Cette étude expérimentale a pour objectif de comprendre l'influence de la saturation liquide et du chargement mécanique sur les déformations au gel-dégel d'un mur en terre crue. Dans le cas des teneurs en eau normales en hiver ($HR < 95\%$), les échantillons ne présentent que des déformations thermiques. Le phénomène de gel-dégel de l'eau dans le matériau terre intervient significativement pour des degrés de saturation liquide pathologiques ($S > 75\%$). Le retrait au gel pourrait être attribué au phénomène de cryosuction et de séchage des particules d'argiles. L'application d'une contrainte axiale de 100 kPa accentue significativement les déformations permanentes lors des premiers cycles.

5. Références bibliographiques

- ASTM International. 2016. ASTM D560 / D560M-16, Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures, issued 2016.
- Aubert, J.E, and M Gasc-Barbier. 2012. "Hardening of Clayey Soil Blocks during Freezing and Thawing Cycles." *Applied Clay Science* 65–66: 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.04.014>.
- Bui, Quoc-Bao, Jean-Claude Morel, Stéphane Hans, and Peter Walker. 2014. "Effect of Moisture Content on the Mechanical Characteristics of Rammed Earth." *Construction and Building Materials* 54 (March): 163–69.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067>.
- Champiré, Florian, Antonin Fabbri, Jean-Claude Morel, Henry Wong, and Fionn McGregor. 2016. "Impact of Relative Humidity on the Mechanical Behavior of Compacted Earth as a Building Material." *Construction and Building Materials*, 110, 2016.
- Dagesse, D. F. 2010. "Freezing-Induced Bulk Soil Volume Changes." *Canadian Journal of Soil Science* 90 (3): 389–401. <https://doi.org/10.4141/CJSS09054>.
- Hamilton, A B. 1966. "Freezing Shrinkage in Compacted Clays." *Canadian Geotechnical Journal* 3 (1): 1–17. <https://doi.org/10.1139/t66-001>.
- Konrad, J.-M. 1989. "Physical Processes during Freeze-Thaw Cycles in Clayey Silts." *Cold Regions Science and Technology* 16: 291–3063. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(89\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0165-232X(89)90029-3).
- McGregor, Fionn, Andrew Heath, Andrew Shea, and Mike Lawrence. 2014. "The Moisture Buffering Capacity of Unfired Clay Masonry." *Building and Environment* 82 (December): 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027>.
- Narloch, Piotr, and Piotr Woyciechowski. 2020. "Assessing Cement Stabilized Rammed Earth Durability in A Humid Continental Climate." *Buildings* 10 (2): 26.
<https://doi.org/10.3390/buildings10020026>.
- Netinger, Ivanka, Martina Vracevic, Jonjaua Ranogajec, and Snezana Vucetic. 2014. "Evaluation of Brick Resistance to Freeze / Thaw Cycles According to Indirect Procedures." *Gradjevinar* 66 (March): 197–209.
<https://doi.org/10.14256/JCE.956.2013>.
- Scarato, Pascal, and Jacky Jeannet. 2015. *Cahier d'expert bâti en pisé- Connaissance, analyse, traitement des pathologies du bâti en pisé en Rhône-Alpes et Auvergne*. ABITerre. Rhône-Alpes.
- Traoré, Lassana Bakary, Claudiane Ouellet-Plamondon, Antonin Fabbri, Fionn McGregor, and Fabrice Rojat. 2021. "Experimental Assessment of Freezing-Thawing Resistance of Rammed Earth Buildings." *Construction and Building Materials* 274 (March): 121917. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121917>.