

Effet des cycles humidification/séchage sur le comportement mécanique des bétons de terre

Nathalie Kouta¹, Jacqueline Saliba¹, Nadia Saiyouri¹

¹ Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), CNRS, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence, France. Nathalie.kouta@u-bordeaux.fr

RESUME Les bétons de terre sont composés essentiellement de particules fines ce qui les rend très sensibles à l'humidité et affecte leur durabilité à long terme. Dans cette étude, l'effet des cycles humidification/séchage sur les bétons de terre avec et sans fibres de lin a été étudié à l'aide de deux techniques : les ultrasons et l'émission acoustique. L'application de ces deux méthodes aboutit à une estimation du taux d'endommagement du béton pendant et à la fin des 25 cycles d'humidification/séchage. La vitesse de propagation des ultrasons a permis de suivre la détérioration progressive du béton lors des cycles. A la fin des cycles, des essais de compression ont été réalisés et suivis par la technique d'émission acoustique. Les résultats ont montré que la dégradation du béton commence durant les premiers cycles d'humidification/séchage avec des fissures visibles à la surface des éprouvettes du béton de terre. La vitesse de dégradation est plus importante pour les éprouvettes sans fibres. Une perte considérable de la résistance a été aussi observée après 25 cycles. L'évolution de l'activité acoustique a été aussi modifiée pour les éprouvettes soumises à des cycles avec des paramètres acoustiques différents (coups, énergie, amplitude, ...) indiquant un endommagement prématuré de ces dernières.

Mots-clefs Béton de terre, fibres de lin, séchage/humidification, émission acoustique, ultrasons.

I. INTRODUCTION

Le secteur de la construction est responsable de 50 % des émissions mondiales annuelles de dioxyde de carbone, d'où le besoin d'un matériau alternatif écologique et durable comme le béton de terre (Ngo et al., 2020). Par contre, la durabilité des bétons de terre constitue un frein majeur face à leur utilisation dans la construction. En effet, la présence d'une grande quantité de particules fines dans les bétons de terre les rend très sensibles à la présence de l'eau et à la différence des humidités relatives. Pour cette raison, des essais de durabilité accélérée ont été réalisés en laboratoire afin de ressaisir les différents phénomènes climatiques naturelles (l'humidité, la température, le vent, la pluie...) (Guettala et al., 2006). Dans cette étude, l'essai de durabilité des cycles de séchage/humidification a été réalisé selon la norme ASTM D559. Cet essai permet de mieux comprendre le comportement de ces matériaux face au changement d'humidité. La dégradation des éprouvettes durant les cycles d'humidification/séchage a été suivie par la technique d'ultrasons.

Cette méthode consiste à déterminer la vitesse de propagation des ondes ultrasonores à partir de la mesure de leur durée de propagation dans le béton de terre. À partir de cette vitesse, il est possible d'évaluer la qualité du béton et de détecter des défauts tels que des fissures ou des vides dans le matériau. L'influence des fibres de lin sur le comportement du béton de terre au cours des cycles de séchage/humidification a été aussi étudiée. L'utilisation de la technique d'émission acoustique peut être efficace afin de comparer le comportement à la rupture des éprouvettes du béton de terre ayant subis des cycles de séchage/humidification à celui des éprouvettes témoins. Cette technique permet de suivre l'accumulation de l'endommagement et donc mieux comprendre le processus de fissuration dans les bétons de terre (Boniface et al., 2020).

Dans un premier temps, les matériaux et les dispositifs expérimentaux sont présentés. Ensuite, l'évolution des propriétés mécaniques du béton de terre avec et sans fibres de lin est étudiée durant les 25 cycles d'humidification/séchage. La vitesse de propagation des ultrasons a été mesurée tout au long des cycles. Finalement, la résistance mécanique est évaluée après 25 cycles et comparée à celle des éprouvettes témoins avec en parallèle un suivi avec la technique d'émission acoustique.

II. MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

A. Matériaux et formulations

Le sol utilisé dans cette étude est un sol artificiel afin de limiter la variabilité des sols naturels et mieux comprendre les mécanismes physiques. Le sol artificiel est composé de 30% de bentonite (75% smectites, 15% illite et 10% de kaolinite) et de 70% de sable afin d'avoir une bonne compacité. Ce mélange est traité par deux types de liants hydrauliques la chaux et le ciment afin d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité de ces bétons de terre. La chaux utilisée est une chaux hydraulique (NHL5) selon la norme européenne EN 459-1 avec un pourcentage de 3% du mélange sable-argile. Ce pourcentage a été fixé d'après d'autres études dans la littérature qui ont montré que de 2 à 4 % de chaux sont suffisants pour stabiliser un sol (Kouta et al., 2020a). Le ciment utilisé est le ciment CEM 1, 52.5 N PM-CP2 adopté au standard NF EN197-1. Le pourcentage de ciment est de 8% (Kouta et al., 2020b) de la masse de la formulation afin d'assurer une résistance minimale. Suite au mélange des différents composants du béton de terre, différents pourcentages (0 ; 0,3 et 0,6%) de fibres de lin de 12 mm de longueurs ont été ajoutés.

B. Procédure expérimentale

Les essais d'humidification/séchage ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de dimensions 10 x 10 x 10 cm³. Ces éprouvettes ont été coulées et conservées pendant 24 heures en conditions endogènes. Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et conservées pendant 28 jours dans une salle à une température de 20 °C et 90% d'humidité relative. Après 28 jours, deux éprouvettes ont été soumises à des cycles d'humidification/séchage et les deux autres ont été utilisées en tant qu'éprouvettes témoins et conservées dans les mêmes conditions de cure sans subir les cycles. 25 cycles d'humidifications et séchages ont été réalisés selon la norme ASTM D559 en modifiant la température de séchage à 60°C pour éviter la déshydratation du ciment. Un cycle d'humidification/séchage est divisé en deux phases : la première phase consiste à placer l'éprouvette dans l'eau pendant 5 h tandis que la deuxième phase consiste à placer les éprouvettes

dans un four à 60°C pendant 42 h. Les éprouvettes qui ont subi des cycles ont été désignées par AC et les éprouvettes témoins ont été désignées par SC.

Le système des ultrasons utilisé dans cette étude est composé d'un générateur d'impulsions PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester) avec deux transducteurs. Une impulsion électrique est convertie en ondes de pression longitudinales d'une fréquence de 200 kHz à l'aide de l'émetteur couplé à la surface avec du gel.

Les essais de compression ont été réalisés à l'aide d'une machine électromécanique d'une capacité de 100 kN. Ces essais ont été pilotés avec le déplacement du vérin avec une vitesse constante de 0,6 mm/min. Ces essais ont été suivis en parallèle avec la technique la technique d'émission acoustique, afin d'étudier l'évolution de l'endommagement. Le système d'acquisition utilisé est AEWIN à huit voix avec un système d'analyse et de stockage de données. Huit capteurs piézoélectriques de type R15 ont été utilisés. Les capteurs ont été placés sur deux côtés opposés de l'éprouvette à l'aide d'une fine couche de silicone pour assurer un bon couplage et donc une bonne transmission des ondes entre l'éprouvette et les capteurs. Les signaux détectés ont été amplifiés avec un amplificateur différentiel de 40 dB. Le seuil de détection a été fixé au début de l'essai à 35 dB pour éviter les bruits.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La Figure 1 montre l'évolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores après la phase de mouillage des éprouvettes au cours des cycles en comparaison avec celle des éprouvettes témoins conservées à 20 °C et 90% d'humidité relative. La vitesse à 28 jours est égale à 2006 m/s et diminue avec l'ajout des fibres à 1900 m/s pour SA03F et 1800 m/s pour SA06F ce qui peut être dû à la faible densité des fibres et une porosité plus importante pour les éprouvettes contenant des fibres de lin (Zou and Meegoda, 2018). Cette vitesse reste presque stable pour les éprouvettes témoins tandis qu'elle diminue au cours des cycles humidification/séchage indiquant la dégradation du béton. La vitesse diminue rapidement pendant les 4 premiers cycles jusqu'à presque la moitié et continue à diminuer lentement jusqu'au moment où la mesure de vitesse devient impossible après le 5ème cycle pour SA0F et après le 9ème cycle pour SA03F et SA06F. Ceci indique un endommagement prématuré pour les éprouvettes SA0F. Ces résultats sont en cohérence avec la dégradation observée sur les différentes faces des éprouvettes de béton de terre. En effet, la propagation de grandes discontinuités ou fissurations dans le matériau et plus particulièrement pour SA0F empêche la propagation des ondes ultrasonores d'un capteur à un autre et donc les mesures. Ceci indique aussi la présence des fissures traversantes et non seulement à la surface du matériau.

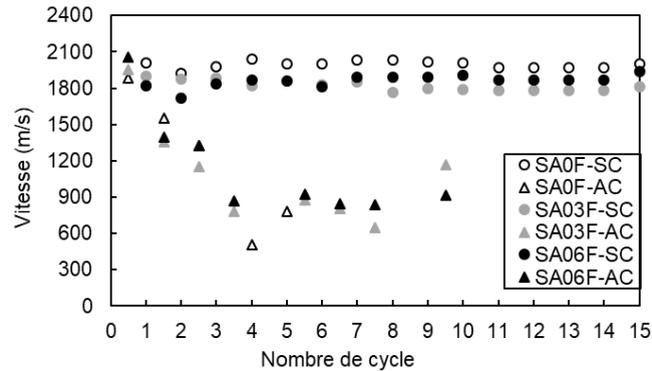


FIGURE 1. Evolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en fonction du nombre des cycles d'humidification/séchage et comparaison avec la vitesse des éprouvettes témoins.

B. Activité acoustique

La Figure 2 présente la corrélation entre la contrainte et le nombre cumulé des signaux d'émission acoustique lors des essais de compression pour SA0F, SA03F et SA06F avec et sans cycles. La résistance à la compression a fortement diminué suite aux 25 cycles d'humidification/séchage avec un taux de 63% pour SA0F, 48% pour SA03F et 46% pour SA06F. Pour les éprouvettes témoins, l'activité acoustique est très faible dans la phase élastique et augmente très lentement dans la phase non linéaire (avant le pic) avec des signaux de faible amplitude indiquant le début du développement des microfissures. Le taux de l'activité acoustique augmente après le pic indiquant la propagation des fissures dans l'échantillon. A noter ici que l'activité acoustique augmente avec le pourcentage de fibres indiquant des mécanismes d'endommagement supplémentaires et différents comme les microfissures aux interfaces matrice/fibres, le pontage et les frottements (Saliba and Mezhoud, 2019). L'évolution de l'activité acoustique au cours du chargement est différente pour les éprouvettes qui ont subies des cycles. En effet, l'activité acoustique augmente avec un taux important dès le début de l'essai pour les trois formulations avec la libération des signaux énergétiques indiquant l'absence de la phase élastique et l'évolution de l'endommagement même pour de faible niveau de chargement. A l'inverse des éprouvettes sans cycles, le taux de l'activité acoustique diminue en s'approchant du pic et se stabilise après indiquant que la rupture des éprouvettes se fait avant le pic. Le nombre cumulé des signaux est aussi plus importants pour les éprouvettes avec un pourcentage plus grand de fibres. Par contre, le nombre cumulé des signaux est beaucoup moins important pour les éprouvettes qui ont subi des cycles, ce qui peut être relié à la diminution de la résistance ainsi qu'à la dégradation des fibres et de l'interface fibres/matrice. De plus, pour les éprouvettes qui ont subi des cycles d'humidification/ séchage, les amplitudes des signaux ont de valeurs importantes au début de l'essai diminuent après le pic à l'inverse des éprouvettes témoins. Ceci peut être dû à la dégradation des fibres de lin pendant les cycles. En effet, la présence des fibres dans un milieu alcalin provoque leur minéralisation due à la migration des produits d'hydratation, en particulier l'hydroxyde de calcium, vers les parois cellulaires spécifiquement le lumen, les parois et les vides des fibres (Wei and Meyer, 2014). Ceci est responsable de la décomposition de la lignine. De plus, les hémicelluloses internes subissent facilement l'hydrolyse alcaline, ce qui conduit à l'élimination des microfibrilles de cellulose. Ainsi, pour les éprouvettes témoins, les fibres ont assuré la liaison dans la partie post pic avec une rupture par arrachement des fibres, augmentant ainsi la ductilité ; tandis que pour les éprouvettes ayant subis les cycles, les fibres ont été cassées facilement à la rupture avec une rupture fragile.

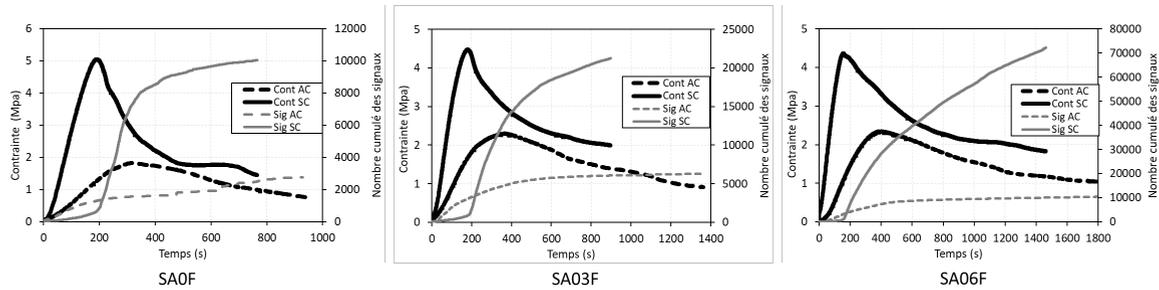


FIGURE 6. Corrélation entre la contrainte et le nombre cumulé des signaux pour SA0F, SA03F et SA06F sans cycles et à la fin des cycles.

IV. CONCLUSIONS

La durabilité du béton de terre avec et sans fibres de lin vis-à-vis des cycles d'humidification et de séchage a été étudiée. La vitesse des ondes ultrasonores diminue au cours des cycles avec une dégradation visuelle du béton. Les résultats ont montré que l'addition des fibres de lin permet de ralentir la dégradation du béton de terre durant les cycles. La résistance à la compression et le module de Young ont fortement diminué après 25 cycles. De plus, une activité acoustique importante a été détectée avant le pic pour les éprouvettes qui ont subi des cycles. Une étude supplémentaire sera réalisée par la suite afin de mieux comprendre l'évolution des propriétés du béton durant les cycles d'humidification/séchage en suivant le pH, la conductivité électrique, l'absorption... ainsi que la dégradation des fibres de lin.

REFERENCES

- Guettala, A., Abibsi, A., Houari, H., 2006. Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Constr. Build. Mater.* 20, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.001>
- Kouta, N., Saliba, J., Saiyouri, N., 2020a. Effect of flax fibers on early age shrinkage and cracking of earth concrete. *Constr. Build. Mater.* 254, 119315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119315>
- Kouta, N., Saliba, J., Saiyouri, N., 2020b. Fracture behavior of flax fibers reinforced earth concrete. *Eng. Fract. Mech.* 241, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107378>
- Wei, J., Meyer, C., 2014. Degradation rate of natural fiber in cement composites exposed to various accelerated aging environment conditions. *Corros. Sci.* 88, 118–132. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.029>
- Zou, Z., Meegoda, J.N., 2018. A Validation of the Ultrasound Wave Velocity Method to Predict Porosity of Dry and Saturated Cement Paste 2018.
- A. Boniface, J. Saliba, Z.M. Sbartai, N. Ranaivomanana, J-P. Balayssac, « Evaluation of the acoustic emission 3D localisation accuracy for the mechanical damage monitoring in concrete », *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 223, 2020
- Saliba, J., Mezhoud, D., 2019. Monitoring of steel-concrete bond with the acoustic emission technique. *Theor. Appl. Fract. Mech.* 100, 416–425. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.01.034>
- Ngo D. C., Saliba J., Saiyouri N., Sbartai Z. M., 2020. Design of a soil concrete as a new building material – effect of clay and hemp proportions. *Journal of Building Engineering*, 101553.