
Evaluation de la déformation durant une infiltration de l'eau dans le tuffeau

Mohamed-Ahmed Hassine¹, Kévin Beck¹, Xavier Brunetaud¹, Muzahim Al-Mukhtar¹

¹ Université d'Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France
mohamed-ahmed.hassine@etu.univ-orleans.fr ; kevin.beck@univ-orleans.fr ; xavier.brunetaud@univ-orleans.fr ; muzahim.al-mukhtar@univ-orleans.fr

RÉSUMÉ. La principale dégradation du tuffeau est un détachement de plaques de la surface de la pierre. Notre programme expérimental vise à évaluer le mécanisme des desquamations par le couplage des contraintes mécaniques, hydriques et thermiques. Concernant l'action hydrique et afin de suivre le comportement de la pierre lors de l'infiltration d'eau à proximité de la surface, on a utilisé des rosettes de jauges de déformations pour mesurer localement la déformation pendant une imbibition. Dans cette communication, les résultats concernant les déformations différentielles entre la surface et le cœur de la pierre due à l'infiltration d'eau seront présentés. Ils montrent une zone de contraction locale et une zone d'expansion dans chaque direction, montrant que localement la dilatation hydrique est plus forte que celle mesuré globalement.

ABSTRACT. The main degradation of tuffeau is a progressive spalling of thick plates from the surface of the stone. Our experimental program aims to assess the mechanism of spalling decay activated due to the coupling of mechanical, hydric and thermal stresses. Concerning hydric action and in order to follow the behaviour of the stone during water infiltration mainly near the surface, strain gauge rosettes were used to measure locally the strain during water infiltration. In this communication, results concerning differential strains between the surface and the core of the stone due to water infiltration will be presented. They demonstrate the local contraction zone and expansion zone in each direction, showing that locally the water dilation is stronger compared to that measured globally

MOTS-CLÉS : pierre calcaire, déformations locales, imbibition capillaire, zone contractée, zone tendue.

KEYWORDS: limestone, local strains, capillary imbibition, contraction zone, expansion zone.

1. Introduction

La desquamation en plaques est une dégradation de surface des pierres de construction [VER 08]. Elle se manifeste par une fissure parallèle à la surface de la pierre exposée à l'environnement, générant une plaque dont l'épaisseur est de l'ordre de 1 à 2 cm. Cette plaque finit par tomber, en laissant derrière elle une surface pulvérulente. Les phénomènes responsables de cette altération ainsi que les mécanismes qui engendrent cette dégradation ne sont pas encore clairement identifiés, bien que plusieurs hypothèses ont été proposées et discutées [VER 08] [WAL 15]. Cependant, il existe un consensus sur le rôle de l'eau qui peut être à l'origine de changements dans les propriétés mécaniques et de la dilatation hydrique, et un vecteur de dégradation par le transport de polluants et la dissolution / cristallisation des sels. Afin de mieux connaître la réaction de la pierre face à la pénétration de l'eau, cette communication présente les résultats d'une campagne expérimentale appliquée au tuffeau, pierre très sujette à la desquamation en plaques. L'expérience a consisté à faire imbiber un échantillon de pierre et à mesurer sa déformation à différentes hauteurs de l'échantillon.

2. Matériels et méthodes

1.1. Pierre étudiée : le Tuffeau blanc

Le tuffeau blanc est la pierre de construction la plus courante de la région Centre - Val-de-Loire. Il a été largement utilisé pour la construction de châteaux de la Loire. Le tuffeau, pierre très poreuse (45%), est composé de calcite (50%), de silice (40%) et d'argile (10%). Sa contrainte maximale à la compression à l'état sec est de 12 MPa et à la traction est de l'ordre de 2 MPa. Les caractéristiques mécaniques dépendent du degré de saturation en eau et de l'orientation par rapport au litage. Le tuffeau perd plus de 50% de ses capacités mécaniques maximales lorsqu'il est entièrement saturé. La pierre testée dans cette campagne expérimentale a été extraite de la carrière d'Usseau dans le Centre-Ouest de la France.

1.2. Préparation de l'échantillon

Un échantillon cylindrique de tuffeau (\varnothing 40mm, H 80mm) a été carotté dans la direction parallèle au litage i.e. l'axe du cylindre est parallèle au litage (figure 1). Cette direction a été choisie parce que la procédure d'imbibition utilisée peut simuler une infiltration réelle in situ due à la pluie battante. Quatre rosettes de jauge de déformation ont été collées sur la surface latérale de l'échantillon, à différentes hauteurs : 10 mm (J1), 20 mm (J2), 40 mm (J3), 70 mm (J4). Chaque rosette est composée de trois jauges de déformation, orientées à 0° , 45° et 90° selon les vecteurs propres du chargement, qui correspondent aux mêmes directions que les axes de symétrie de l'échantillon. Les rosettes sont de type "KFG 120" de Kyowa et ont été collées avec la colle "CC-35A". Le diamètre de chaque rosette est de 1 cm. Avant l'essai, l'échantillon a été séché dans une étuve à 60°C pendant 92 heures, puis refroidi dans un dessiccateur.

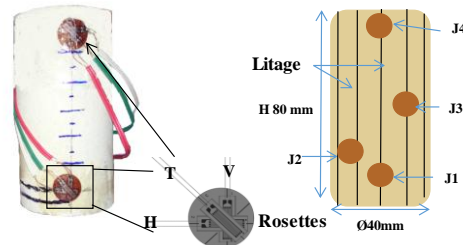


Figure 1. Emplacement des rosettes sur l'échantillon.

1.3. Méthodes

Avant d'entamer le test d'imbibition, des essais de chargement mécanique cyclique ont été effectués pour évaluer le collage des rosettes en vérifiant la répétabilité des mesures. Ces essais permettent également de déterminer l'orientation des jauges en analysant l'orientation de la contrainte par rapport au vecteur propre de chargement. L'essai mécanique a été effectué sur un échantillon sec et comprenait un chargement cyclique entre 0,5 et 1 MPa en compression. Ces contraintes correspondent respectivement à 5% et 10% de la résistance à la compression de tuffeau à l'état sec. Cela garantit que l'échantillon est dans son domaine élastique. L'acquisition des déformations est faite grâce à deux modules NI 9235. Une macro développée sur LabVIEW 2013 a été utilisée pour donner une valeur moyenne de 15 mesures toutes les 5 secondes. Après vérification des rosettes, l'échantillon a été placé sur une grille en plastique rigide qui permet à l'eau déminéralisée d'être absorbée dans l'échantillon par un procédé capillaire. En plus des quatre rosettes, on a placé un comparateur avec une précision de $1\mu\text{m}$ au-dessus de l'échantillon pour mesurer le déplacement vertical global. Une plaque d'aluminium a été placée entre la face supérieure de l'échantillon et le comparateur pour éviter toute singularité de surface. Pendant l'essai, l'eau pénètre dans l'échantillon par capillarité. La fin du test est déterminée par la stabilisation de toutes les mesures (à la fois les rosettes et le comparateur).

3. Résultats et discussions

L'essai de vérification a montré de bons résultats répétables pour les rosettes. Ce qui nous a permis de conclure du bon collage des rosettes et de leurs orientations. La figure 2 montre la variation de la déformation globale de l'échantillon pendant l'essai hydrique (V_{comp}) et l'évolution de la hauteur du front d'imbibition (Front).

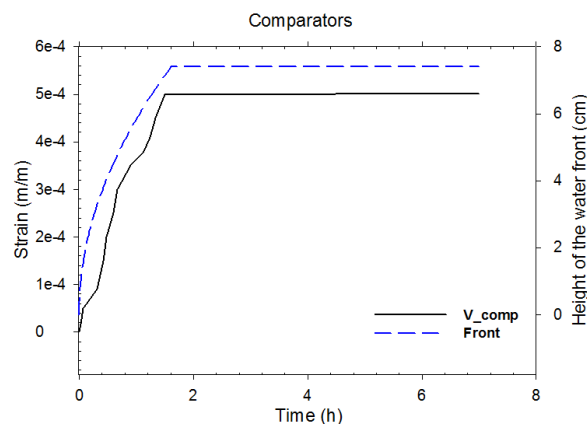


Figure 2. Variation de la déformation globale via le comparateur et l'évolution du front d'imbibition.

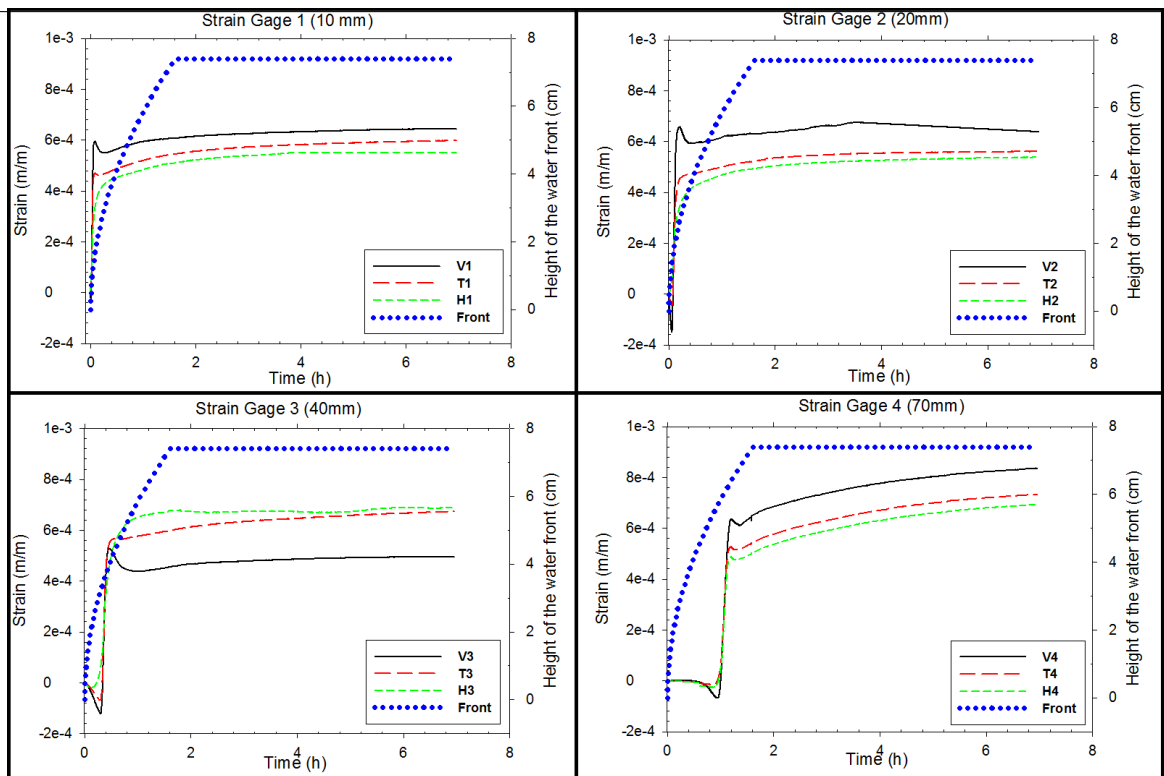


Figure 3. Variation des déformations locales via les rosettes et l'évolution du front d'imbibition.

Le résultat de la déformation globale du tuffeau lors de l'essai d'imbibition (Figure 2) mesurée par comparateur montre qu'elle est monotone et croissante jusqu'à une valeur maximale de $510 \mu\text{m/m}$. Ce résultat est similaire aux résultats présentés dans la littérature [ALO 14]. La figure 3 montre la variation des déformations mesurées par les rosettes et l'évolution de la hauteur du front d'imbibition pendant l'essai hydrique. Les courbes vertes correspondent à la déformation horizontale (H), les courbes noires à la déformation verticale (V) et les courbes rouges à la déformation transversale (T). La déformation négative correspond à la contraction tandis que la déformation positive correspond à l'extension. La courbe bleue (Front) représente l'évolution du front d'imbibition. La valeur de déformation globale mesurée par le comparateur est comparable à celle obtenue par les jauges verticales à la fin de l'imbibition, alors qu'il y a une différence remarquable au niveau de l'évolution de la déformation verticale globale et locale mesurée par les jauges au passage du front d'imbibition (figure 3). Une alternance entre contraction et extension est aperçue localement tandis qu'une monotonie de variation est observé pour la déformation globale mesurée par le comparateur. Ceci montre que la déformation verticale locale durant l'imbibition n'est pas homogène. Quatre phases sont repérées sur la courbe de la déformation verticale. La première phase correspond à une contraction verticale, alors que la déformation horizontale montre un début d'extension légèrement retardé. Cette phase commence avec le début de l'imbibition et se termine lorsque la hauteur d'imbibition est de 5 mm en dessous du bord inférieur de la rosette. La rosette J2 et J4 suivent la même tendance : une contraction verticale et une extension horizontale retardée avant que l'imbibition n'aboutisse à la rosette. L'extension horizontale pourrait être la suite de l'extension horizontale de la partie située au-dessous de la rosette, qui est imbibée par l'eau. Cependant, étant donné qu'il n'y a pas d'eau au niveau de l'emplacement de la rosette (zone plus rigide), cette extension résulte une contrainte de traction horizontale. En raison de l'effet de Poisson, cette contrainte de traction horizontale est accompagnée d'une contrainte de compression verticale, menant à une contraction verticale, comme on l'observe sur les rosettes. Cet effet est local, et le fait que le diamètre des rosettes est de 1 cm peut avoir tendance à sous-estimer cet effet local si la hauteur de l'effet est inférieure à 1 cm. Pour la rosette J1, cette phase ne peut pas être détectée puisque le front d'imbibition l'atteint immédiatement. La deuxième phase commence dès que le front dépasse la rosette. Elle correspond à la fois à l'extension verticale et l'extension horizontale, comme vu pour la déformation globale. Au cours de cette phase, l'amplitude de l'extension verticale est toujours supérieure à l'horizontale. Cette phase se termine lorsque le front d'eau atteint le bord supérieur de la rosette. La troisième phase correspond à une faible contraction verticale par rapport à la valeur maximale d'extension atteinte au cours de la deuxième phase, tandis que la contrainte horizontale continue à augmenter plus lentement. Cette contraction verticale pourrait être le résultat de la désaturation locale de l'eau juste après le passage du front d'eau. Cette désaturation a été observée par [BEC 03] avec un décalage entre la saturation visuelle et la saturation massique qui assurent la fin totale de l'imbibition.

Cette désaturation locale pourrait être la conséquence non linéaire de la compétition entre deux phénomènes dus à la distribution bimodale des pores de tuffeau : l'imbibition capillaire entraînée par la porosité capillaire (vitesse élevée, faible succion) et la saturation des plus petits pores (faible vitesse, haute succion). Enfin, la quatrième phase correspond à la fois à l'extension verticale et horizontale, avec une amplitude très limitée. L'extension finale atteinte par déformation verticale est similaire à la valeur maximale locale pendant la deuxième phase. Pour la rosette J4, le comportement est singulier puisque sa quatrième phase présente une amplitude d'extension plus élevée que les autres jauges. Ceci peut être attribué à une hétérogénéité locale et/ou une faible orientation de la jauge.

Le résultat marquant de cet essai concerne l'effet de l'imbibition sur la déformation locale verticale, car elle ne se limite pas à une extension monotone mais à des séquences d'extension et contraction. L'existence d'une contraction verticale avec une amplitude significative (environ 100 $\mu\text{m/m}$ pendant la phase 1) est particulièrement pertinente pour l'identification du processus de dégradation à l'origine de desquamations. L'amplitude de cette contrainte de traction ne doit pas être négligée par rapport à la résistance à la traction. Par comparaison avec les conditions *in situ* des pierres dans un mur soumis à un événement pluvial, la contraction verticale observée au cours des expériences correspond à une contraction horizontale perpendiculaire à la surface de la pierre. Cela pourrait être l'origine d'une fissure parallèle à la surface à 1 à 2 cm de profondeur, ce qui correspond à la description des desquamations.

4. Conclusion

Cette communication a traité l'effet de la pénétration de l'eau sur la déformation d'un calcaire très poreux (tuffeau) en but d'identifier le processus de dégradation provoquant les desquamations. Les déformations ont été mesurées en utilisant un comparateur et des rosettes de jauges de déformation. Afin de valider le procédé expérimental basé sur des mesures de rosettes, un essai mécanique cyclique a été effectué. Cet essai préliminaire a permis de conclure que, pour la plupart des rosettes utilisées, les mesures étaient conformes aux résultats précédents et à la littérature.

L'utilisation de rosettes permet d'identifier les déformations verticales et horizontales pendant l'imbibition de manière locale. Alors que la déformation horizontale suit une tendance globale d'extension monotone et progressive pendant l'imbibition, la déformation verticale montre un comportement plus diversifié, avec une contraction et une extension alternées. Nous avons proposé quelques hypothèses pour essayer d'expliquer le comportement spécifique de la déformation verticale.

L'existence d'une contraction verticale à la hauteur juste au-dessus du front d'eau peut contribuer à la discussion sur l'origine des desquamations. En effet, cette contraction verticale peut correspondre à la contraction horizontale des pierres *in situ* dans un mur exposé à la pluie. Si le déplacement de cette pierre dans la direction de la profondeur est empêché par un mortier rigide ou une pierre plus dure, il pourrait en résulter une contrainte de traction importante, capable de générer une fissure parallèle à la surface. Comme la profondeur typique de l'imbibition de l'eau pendant un événement pluvial en tuffeau est entre 1 et 2 cm, la profondeur de la fissure serait autour de ces valeurs. Par conséquent, cette contraction verticale observée sur un échantillon soumis à l'imbibition pourrait être un élément clé dans l'explication de l'origine des desquamations. Des expériences de flambement semblables à celles effectuées par Wangler pourraient être intéressantes pour identifier le rôle des argiles dans la pierre testée [WAN 11].

5. Bibliographie

- [VER 08] Collectif. ICOMOS-ISCS, Glossaire illustré des formes d'altération de la pierre, coordonné par Vergès-Belmin V., Traduction en Français par Bromblet P., Vallet J.M., 2008.
- [WAL 15] WALBERT C., Evolution of the mechanical behaviour of limestone subjected to freeze–thaw cycles Evolution of the mechanical behaviour of limestone subjected to freeze–thaw cycles, *Environmental Earth Sciences*.74,2015, pp 6339-6351
- [ALO 14] Al-Omari, A., Risk assessment of thermo-hydro-mechanical stone decay in built heritage, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2014.
- [BEC 03] Beck, K., AL-Mukhtar, M., Rozenbaum, O., & Rautureau, M. Characterization, Water transfer properties and deterioration in tuffeau building material in the Loire valley- France. *Building and Environment*, 2003, pp 1151-1162
- [WAN 11] Wangler T.P., Stratulat A., Duffus P., Prévost J.-H., Scherer G.W., Flaw propagation and buckling in clay-bearing sandstones, *Environmental Earth Sciences*. 63 [7-8], 2011, pp 1565-1572