

RÉPARATION DE MOLASSE PAR UNE PIERRE ARTIFICIELLE : MESURE SUR SITE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES ET DE LEURS IMPLICATIONS DANS LA PIERRE

RE-PROFILING OF ALTERED BUILDING SANDSTONES : ON-SITE MEASUREMENT OF THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND THEIR EVOLUTION IN THE STONE

Thibault DEMOULIN¹, Fred GIRARDET² and Robert J. FLATT^{1*}

¹ ETH Zurich - Institute for Building Materials - Stefano-Francini-Platz 3, CH-8093 Zurich

² RINO Sàrl - Ruelle Belle Maison 14, CH-1807 Blonay

* Corresponding author : flatt@ethz.ch

1. INTRODUCTION

Le terme de reprofilage, dans le domaine de la conservation des bâtiments historiques, se rapporte au remplacement d'une partie altérée d'une pierre à l'aide d'un mortier plastique modelé pour reproduire la forme de la pièce à remplacer. C'est une approche intéressante quand la préservation du matériau original est la priorité puisqu'il permet d'éviter son remplacement complet et ainsi d'étendre

sa durée de vie. Le présent travail fait partie d'un projet dédié à l'étude d'une pierre artificielle faite à partir de résine acrylique, développée à la fin des années 70 à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, en Suisse, et appliquée en tant que matériau de reprofilage lors de la restauration de l'Hôtel de Ville de Lausanne. Après plus de trente ans, la durabilité de ce mortier a relancé l'intérêt des tailleurs de pierre qui l'ont de nouveau utilisé lors de la restauration de l'église catholique Notre-Dame de Vevey (Canton de Vaud, Suisse) en 2011.

Cependant, ce type de restauration soulève un certain nombre de questions à propos de possibles incompatibilités entre pierres naturelles et pierres artificielles adjacentes. Notamment, la question de l'influence de propriétés thermiques, hydriques et hygroscopiques différentes sur la durabilité de la réparation et plus important, sur l'état de la pierre sous-jacente n'a pas été examinée de manière systématique. Ces propriétés gouvernent la réponse des matériaux aux conditions environnementales, qui sont déterminantes dans la dégradation des pierres de construction [CAM 13][SMI 08][ALO 14B][ALO 14C].

Ces questions sont particulièrement pertinentes au vu des caractéristiques du reprofilage, une insertion directe sans joint, et de la nature de la pierre considérée dans cette étude, un grès appelé molasse. C'est un grès principalement composé de quartz et de feldspath cimentés par de la calcite et des argiles qui peuvent être gonflantes [KUN 97]. Il est de ce fait sensible aux cycles de mouillage – séchage qui peuvent provoquer la formation de plaques avec des épaisseurs variant de 0.5 à 3 cm [FUR 83][JIM 08]. Ces altérations se forment parallèlement à la surface et sont indépendantes de l'orientation des lignes de plus grande fragilité de la pierre, c'est-à-dire de son lit ; cependant, cette profondeur est variable suivant les pierres. Cela suggère que c'est la combinaison des propriétés de transport d'eau intrinsèques à la pierre et des conditions environnementales qui conduit le procédé de dégradation à atteindre des niveaux de contrainte critiques seulement à une certaine profondeur. Au-delà de cette profondeur critique la pierre est généralement en bonne état. Une illustration édi-

fante peut être vue dans la carotte présentée en Figure 1, qui a été prélevée dans la partie extérieure d'un mur de l'église catholique Notre-Dame de Vevey. On peut y voir une fissure caractéristique d'une formation de plaque, qui court parallèlement à la surface extérieure (2 cm de profondeur dans ce cas). Cette fissure est perpendiculaire au litage qui suit l'axe longitudinal de la carotte.

Dans le but d'étudier les conditions qui provoquent ces altérations et l'impact du reprofilage sur la pierre naturelle, une campagne de mesure a débuté en juillet 2013 à Notre-Dame de Vevey. Elle vise à comparer les conditions thermiques et hygroscopiques régnant à la surface et à l'intérieur d'une pierre naturelle non réparée avec celles d'une pierre naturelle reprofilée, sur un mur de l'église. Pour ce faire, la température et l'humidité relative sont enregistrées de la surface jusqu'à une profondeur de 6.7 cm dans ces deux matériaux. De plus, les quantités d'eau de pluie battante et d'eau de pluie absorbée par la pierre naturelle et artificielle sont mesurées. L'appareillage utilisé ainsi que les premières données obtenues de juillet 2013 jusqu'à janvier 2014 sont présentés.

2. MÉTHODE

L'emplacement adéquat pour installer les capteurs doit être à la fois exposé à la pluie et au soleil, et présenter conjointement un reprofilage suffisamment grand et de la molasse saine. L'examen du bâtiment un jour de pluie nous a permis de retenir un tel emplacement sur le contrefort d'une absidiole, à approximativement six mètres du sol. On peut le

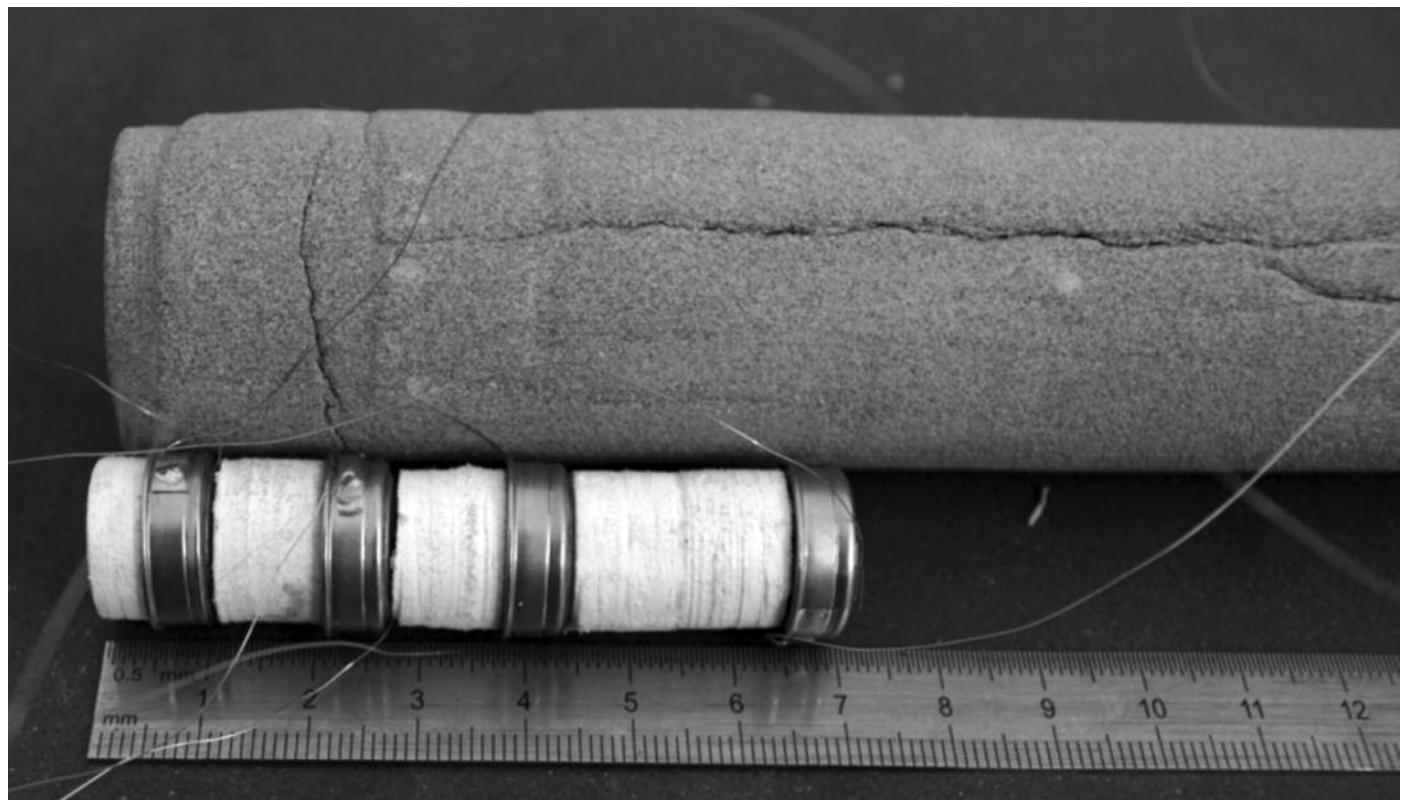


Figure 1. Carotte provenant d'une pierre altérée de Notre-Dame de Vevey, et vue des capteurs insérés dans la pierre (disques métalliques).

voir sur la vue du dessus en Figure 2, orienté Nord. L'emplacement sélectionné est face à l'Ouest et de ce fait est ensoleillé en fin de journée durant l'été ; à cause des immeubles avoisinants et de la position basse du soleil pendant l'automne et l'hiver, il n'est pas atteint par le soleil pendant ces périodes. La pierre à cette emplacement est soumise à des conditions sévères comme en témoignent les récentes restaurations, où la molasse ancienne a été reprofilée avec la pierre artificielle ou entièrement remplacée par du grès bleu d'Ostermundigen. Les mesures sont effectuées sur la molasse d'origine ainsi que sur le même matériau adjacent mais reprofilé avec une couche de matériau de réparation.

Un facteur déterminant dans le choix de l'emplacement était aussi d'avoir des surfaces de mesure suffisamment grandes pour collecter l'eau ruisselante durant les événements de pluie. C'est la raison pour laquelle la réparation montrée en Figure 2 est beaucoup plus large qu'une réparation typique. La même Figure permet d'appréhender la proximité des mesures et les dimensions du matériau de réparation (12 cm de large pour 2 cm d'épaisseur), représenté par un rectangle gris délimité par une ligne en pointillé sur le schéma.

La présence sur le marché de capteurs de petite taille, robustes et autonomes permet de développer une instrumentation relativement non invasive qui peut être abandonnée dans un mur pendant plusieurs semaines. Un projet similaire a montré la faisabilité de telles investigations reliées à la dégradation de pierres de construction [ALO 14A].

2.1. Température et humidité relative

Dans le but de mesurer la température et l'humidité relative à différentes profondeurs dans le mur, plusieurs acquiseurs sont associés et séparés les uns des autres par du PVC expansé, un matériau avec une faible conductivité thermique (0.06 W/m.K, contre 2.30 W/m.K pour la molasse). En Figure 1 sont montrés les acquiseurs

(disques gris sur la photo) montés ensemble avec le PVC expansé (matériau blanc), avant l'insertion du tout dans un gaine rétractable protectrice. Comme indiqué sur la même figure, la région intéressante pour mesurer la température et l'humidité relative s'étend de la surface aux premiers centimètres de la pierre; dans notre cas, ces paramètres sont relevés dans l'air, à la surface, à 0.8, 2.5, 4.1 et 6.7 cm dans la pierre. Les capteurs placés dans la pierre artificielle mesurent donc ces données dans le matériau de réparation (à la surface et à 0.8 cm) et dans la pierre naturelle qu'il recouvre (à 2.5, 4.1 et 6.7 cm). L'acquisition de ces données s'effectue toutes les 30 minutes. Bien qu'une fréquence de mesure plus importante puisse être appropriée pour mesurer les changements rapides de température à la surface de la pierre, comme suggéré par Hall [HAL 99], la profondeur de mesure qui nous intéresse le plus se situe à 2.5 cm dans la pierre, et les changements de température à cette profondeur sont supposés moins rapides.

Les capteurs appliqués à la surface des matériaux sont encapsulés dans du PVC expansé et le contact thermique est assuré par une rondelle métallique. Pour protéger le volume d'air délimité par la rondelle de contaminants tel que des sels, qui perturberaient la mesure de l'humidité, la rondelle est encerclée par un filtre en PTFE. Le capteur mesurant la température et l'humidité de l'air est positionné à quelques centimètres du mur; en conséquence, il mesure l'environnement direct du bâtiment. Il est aussi protégé des radiations directes du soleil par un écran peint en blanc.

Les capteurs utilisés sont des capteurs capacitifs Dallas Hygrochron qui mesurent à la fois la température et l'humidité relative et fonctionnent avec le protocole "1-Wire". Cela permet d'avoir autant de câbles que de capteurs, plus un pour la masse, et ainsi de limiter autant que possible l'impact physique de la mesure qui pourrait être perturbée par l'infiltration d'eau ou par la conduction thermique des fils. De plus, chaque capteur étant un acquiseur autonome, le recours à un boîtier d'acquisition externe est évité, ce qui réduit l'aspect invasif de l'installation.

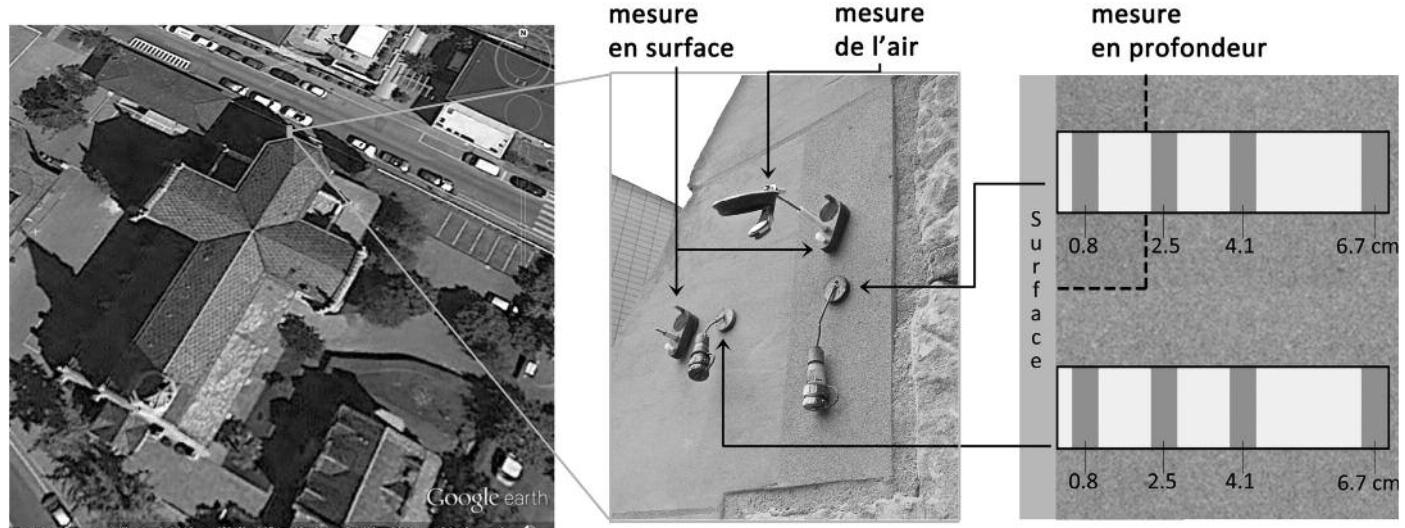


Figure 2. Vue du dessus de l'église (Google Earth) et position des capteurs de température et d'humidité. A noter sur la photo la pierre artificielle à la droite de la pierre naturelle.

Les capteurs mesurent la température dans une fenêtre de -20 à 85 °C avec résolution de 0.06 °C et une précision de 0.5 °C entre -10 et 64 °C, ce qui couvre bien les conditions observées durant la campagne. L'humidité relative est mesurée de 0 à 100 %, avec une précision de 2 % dans une zone qualifiée de "sûre", c'est-à-dire dans une fenêtre comprise entre 0 et 50 °C, ce qui couvre plutôt bien les conditions observées pendant les mois de juillet jusqu'à novembre. Cependant la mesure des humidités relatives supérieures à 90% est sujette à plus d'imprécision.

2.2. Eau de pluie battante, ruisselante et absorbée

Pendant un épisode de pluie, la pluie battante peut être absorbée par la pierre ou ruisseler le long de sa surface. Etant donné le rôle prépondérant de l'eau dans la dégradation de la pierre, le phénomène de transport d'eau à la surface de la pierre artificielle comme naturelle doit être évalué et quantifié. À cette fin, les quantités d'eau de pluie au sol, d'eau de pluie battante et d'eau de pluie ruisselante sont mesurées, et la différence entre ces deux dernières renseigne sur la quantité d'eau absorbée par la pierre. L'instrumentation utilisée pour ces mesures est présentée en Figure 3. Les mesures de pluie ruisselante sont réalisées par la pesée de l'eau qui s'écoule sur une surface délimitée par un cadre dont la partie inférieure amène l'eau dans des bouteilles en verre dont le contenu est régulièrement pesé par un opérateur. Une automatisation du système est en cours, mais n'était pas encore en opération à la date des mesures rapportées dans cette étude. Les cadres occupent une surface de 690 cm² chacun. La quantité de pluie bat-

tante est également quantifiée par l'intermédiaire d'un cadre mais qui délimite une surface totalement non-absorbante. À la surface du mur, on peut donc voir trois cadres, qui collectent l'eau battante non absorbée à la surface de la pierre naturelle et artificielle et un troisième qui collecte la totalité de la pluie battante.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Température

À la surface de la pierre, la température présente les mêmes variations journalières et saisonnières que la température de l'air, mais lorsque l'exposition au soleil est possible, c'est-à-dire dans notre cas en fin d'après-midi, on observe des montées en température importantes. De juillet à janvier la température de l'air a varié entre 35.2 à -2.3 °C dans l'entourage proche de l'église, alors qu'à la surface de la pierre elle a pu atteindre 47.2 °C et descendre jusqu'à -2.0 °C (Figure 4, gauche)

Des températures supérieures à 40°C à la surface de la pierre ne sont pas rares puisqu'on a pu en enregistrer 25 occurrences pendant cet été. Les plus grandes amplitudes ont été enregistrées en juillet et août, comme montré en Figure 4 (droite), où les températures ont fluctué avec une amplitude moyenne de 20.3 °C. La vitesse de montée en température maximale a été de 0.22 °C/min, le 1^{er} août, occasionnant une différence de température de 13.5 °C dans les premiers 6.7 cm de la pierre. Par contre, à l'interface entre le matériau de réparation et la pierre naturelle

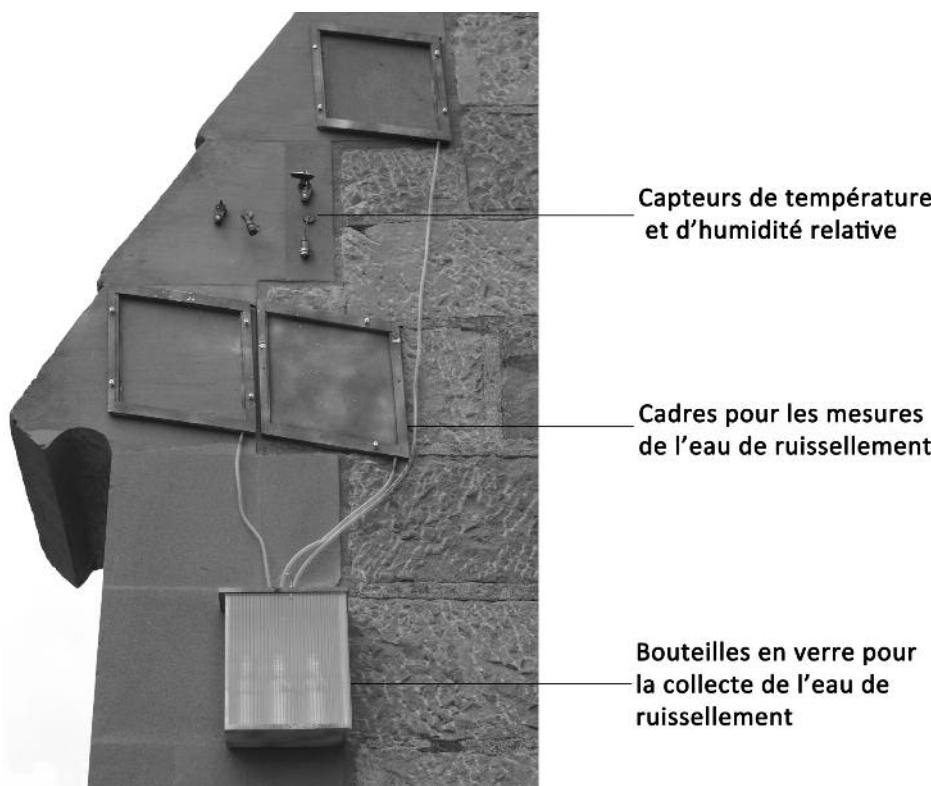


Figure 3. Vue de l'instrumentation avec les capteurs de température et d'humidité ainsi que les cadres pour la mesure de l'eau ruisselante et battante.

qu'il recouvre, c'est-à-dire à 2.5 cm dans le mur, la variation en température n'est plus que de 11 °C et la vitesse de changement de température deux fois plus lente qu'à la surface, à savoir 0.11 °C/min.

D'un autre côté, les températures négatives à la surface de la pierre sont survenues 16 fois pendant les mois de décembre et janvier. À ces occasions, des températures négatives à 6.7 cm dans la pierre sont apparues 14 fois. Il faut savoir que l'hiver 2013 a été particulièrement clément en Suisse.

3.2. Pluie battante et quantité d'eau absorbée

Malgré la petite distance entre les cadres chargés de collecter l'eau ruisselante, l'emplacement choisi, à savoir sur un contrefort près de l'abside, favorise les turbulences et provoque des expositions différentes à l'eau de pluie. Pour être en mesure de comparer les absorptions d'eau entre les deux matériaux, cette différence d'exposition a dû être quantifiée et corrigée par un facteur d'ajustement. Pour ce faire, un matériau non-absorbant a été placé dans les cadres pour mesurer la pluie battante aux trois positions, pendant six épisodes de pluie du 2 au 28 octobre 2013. Un facteur d'ajustement ainsi qu'un intervalle d'erreur ont été calculés pour chaque position qui, malgré la nature aléatoire des précipitations, aident la comparaison entre les valeurs mesurées par les différents cadres. Comparé au matériau entièrement non-absorbant, la pierre naturelle a reçu durant ces épisodes pluvieux 1.62 ± 0.35 fois plus d'eau et la pierre artificielle 1.21 ± 0.15 fois plus d'eau. Ces facteurs sont utilisés dans les calculs qui ont conduits aux résultats suivants.

Pendant la période étudiée, 407.9 kg/m² d'eau sont tombés sur le sol en 14 épisodes de pluie distincts. Sur cette quantité, 14.8 kg/m², soit 3.6 %, ont été poussés par le vent sur le mur sous forme de pluie battante. La pierre naturelle a absorbé 41.8 % de cette pluie battante, tandis que la pierre artificielle n'en a absorbé que 2.4 %. Même si ces chiffres

sont dépendants de la nature très aléatoire des précipitations, il n'en reste pas moins vrai que la différence d'absorption entre les deux matériaux est très significative. On peut dire que la pierre artificielle absorbe en moyenne 17 fois moins d'eau que la pierre naturelle, malgré sa porosité plus élevée (35 % contre 17 % pour la molasse d'Ostermundigen). La différence d'absorption est expliquée par le caractère hydrophobe de la résine acrylique. En conséquence, une grande partie de la pluie battante dirigée vers la surface de la pierre artificielle ruisselle et est redistribuée sur les pierres se situant en-dessous. Il est toutefois important de préciser que les surfaces réparées par des pierres artificielles sont en général très petites par rapport aux surfaces de pierres naturelles, et que ce n'est pas la totalité de l'eau ruisselante qui va être immédiatement absorbée par la pierre naturelle en-dessous de la pierre artificielle. La redistribution de cette eau additionnelle va dépendre des caractéristiques des précipitations (intensité, direction du vent) et son impact doit être évaluée dans un contexte plus global prenant en compte les surfaces respectives des deux matériaux et leur position sur l'édifice.

3.3. Humidité relative

L'amplitude des variations de l'humidité relative à la surface de la pierre naturelle est moins prononcée que celle de l'air, mais montre quand même des variations importantes pendant l'été, comme on peut le voir sur la Figure 5 (gauche). Ces variations diminuent grandement à l'intérieur de la pierre. Elles sont relativement importantes dans le premier centimètre, mais s'atténuent très rapidement et sont complètement amorties après le quatrième centimètre. À partir d'octobre, après le premier centimètre et pour les deux matériaux, l'humidité relative reste à 100 %. La mesure d'une humidité relative élevée étant sujette à une imprécision accrue, une surestimation de l'humidité ne peut pas être exclue, bien qu'une simple vision de la surface de la pierre tende à montrer qu'elle reste effectivement humide en hiver.

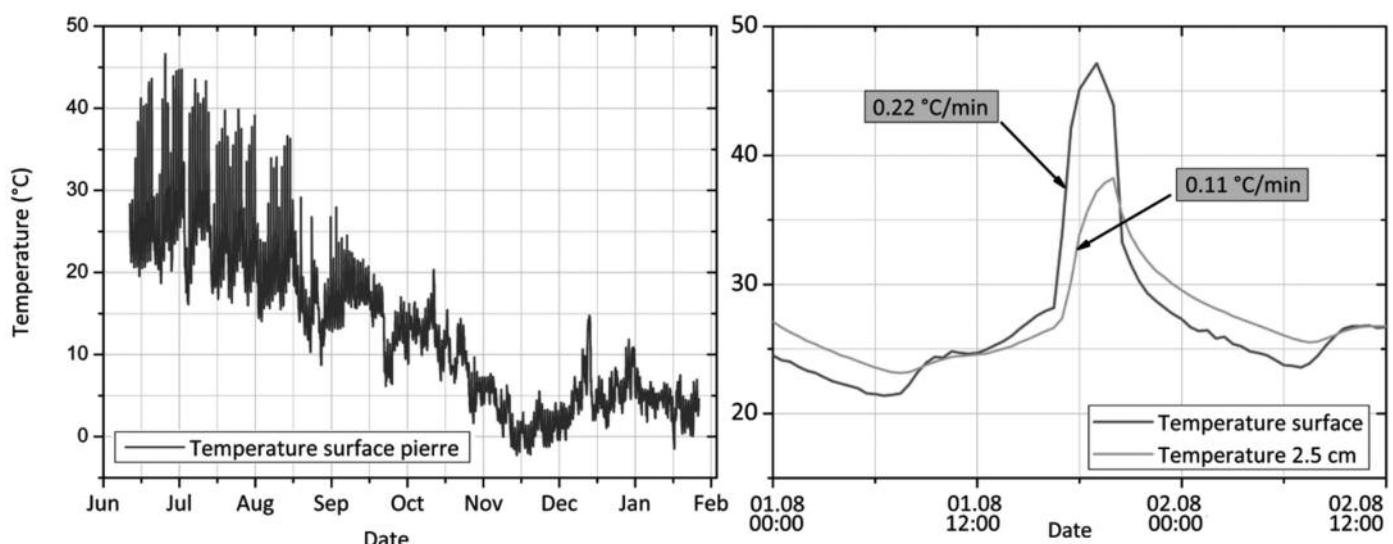


Figure 4. Évolution de la température à la surface de la pierre naturelle pendant la période de mesure (à gauche) et comparaison entre la température à la surface de la pierre et à 2.5 cm dans le mur (à droite).

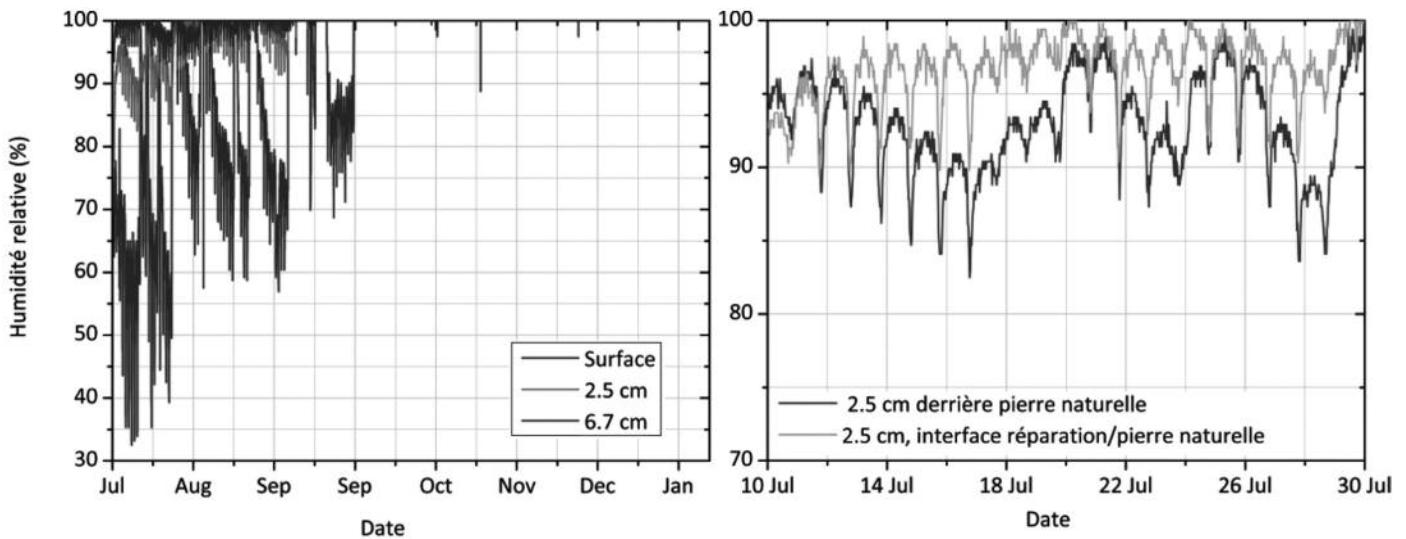


Figure 5. Évolution de l'humidité relative pendant la période de mesure (à gauche) et vue rapprochée de l'humidité relative à une profondeur de 2.5 cm (à droite).

Les variations régulières dues à l'alternance du jour et de la nuit sont de l'ordre de 20 % pendant les mois d'été. La grande expansion linéaire (jusqu'à 2.34 mm/m) mesurée sur la pierre de Villarlod quand elle est immergée dans de l'eau liquide [FEL 95] laisse supposer que de telles variations dans l'humidité relative de l'air puisse aussi fragiliser la pierre par fatigue.

On peut noter que les variations les plus importantes interviennent pendant les mois de juillet et d'août. C'est pourquoi cette période est élargie en Figure 5 (à droite), qui compare l'humidité relative dans la pierre naturelle, lorsqu'elle est recouverte ou non de pierre artificielle. Il est intéressant de noter que ces variations sont en moyenne plus prononcées dans les premiers centimètres de la pierre naturelle lorsqu'elle n'est pas recouverte de pierre artificielle. L'humidité relative la plus basse à la surface des deux matériaux a été de 32 % en juillet, alors que la variation la plus soudaine est apparue à la fin du même mois lorsqu'elle est brusquement passée de 54.4 à 100 % lors d'une pluie soudaine.

3.4. Point de rosée

La comparaison du point de rosée à différentes profondeurs dans la pierre, à un moment particulier, donne des indications utiles sur la direction du transfert de vapeur d'eau. En effet le point de rosée, calculé par la formule de Magnus à partir des valeurs de température et d'humidité relative [LAW 05], est directement lié à la pression de vapeur d'eau. Un fait intéressant, illustré en Figure 6, peut être remarqué à propos de la direction du transfert de vapeur à une profondeur de 2.5 à 4 cm de la surface, après une période chaude sans précipitations à la fin du mois de juillet 2013. Quand la descente nocturne en température apparaît, la pression partielle de vapeur d'eau dans la pierre est plus élevée que celle de la surface et que celle de l'air. La surface peut sécher et un transfert de vapeur apparaît de l'intérieur de la pierre vers l'extérieur. Cependant, pendant le réchauffement diurne, le point de rosée est constamment plus élevé à une profondeur de 2.5 à 4 cm. Cela implique que la migration d'eau s'effectue vers la surface de la

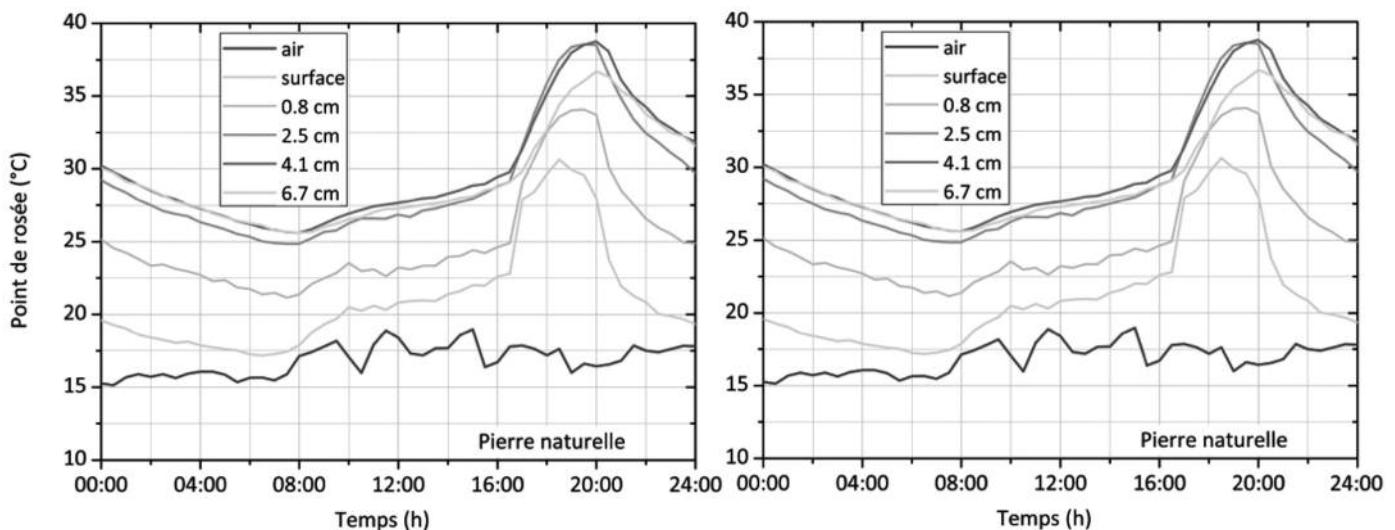


Figure 6. Comparaison du point de rosée à différentes profondeurs, dans la pierre naturelle (à gauche) et dans la pierre naturelle et la pierre artificielle qui la recouvre (à droite).

pierre (séchage vers l'extérieur) mais aussi en profondeur dans la pierre (séchage vers l'intérieur). Ce fait est visible aux deux emplacements et suggère que la pierre artificielle n'empêche pas les transferts de vapeur d'eau, ce qui est cohérent avec sa porosité élevée. L'apparition d'une zone d'humidité plus élevée à une certaine profondeur dans la pierre concorde avec des résultats de modélisation rapportés par Snethlage et Wendler [SNE 97] qui montrent cet effet pour de l'eau liquide. Cette situation peut expliquer conceptuellement le développement de contraintes dans les grès argileux [SCH 05] [WAN 08] et peut aussi être avancée pour expliquer la formation de plaques, préalablement mentionnée, dans ces pierres. À notre connaissance, de tels résultats expérimentaux concernant ce phénomène n'ont pas encore été rapportés et c'est pourquoi ils méritent sérieusement d'être poursuivis.

4. CONCLUSIONS

Cette campagne de mesure menée à l'église catholique Notre-Dame de Vevey a pour but de renseigner sur l'ordre de grandeur des variations de température et d'humidité relative apparaissant sur et dans un mur de grès argileux, et notamment à l'interface entre le grès et un matériau de restauration à base de résine acrylique.

Les premiers résultats obtenus de juillet 2013 à janvier 2014 montrent que la température pendant les mois d'été peut varier régulièrement, à cause du refroidissement convectif nocturne et du réchauffement radiatif diurne, avec une grande amplitude (moyenne de 20.2 °C) et une vitesse de 0.22 °C/min à la surface de la pierre. Cependant, à l'interface entre les deux matériaux la variation de température en une journée n'est plus que de 11 °C, et le réchauffement se fait à une vitesse beaucoup plus faible de 0.11 °C/min.

L'humidité relative varie également beaucoup, de 32 à 100 %. Ces variations périodiques, associées à une relativement grande expansion dimensionnelle de la molasse en conditions hydriques ou hygriques, peuvent jouer un rôle dans une dégradation du matériau par fatigue, d'autant plus que la molasse reste longtemps à des taux d'humidité élevés auxquels lui sont associées des résistances moindres. En particulier le développement d'une zone humide à une certaine profondeur dans la pierre pourrait en partie expliquer la formation de plaques dans ce type de pierre. Ces études seront poursuivies et approfondies dans la prochaine campagne de mesures.

La mesure de la pluie battante et ruisselante permet de mettre en évidence les propriétés différentes des deux matériaux en ce qui concerne l'eau: la pierre artificielle absorbe 17 fois moins d'eau que la pierre naturelle. Cependant, l'humidité relative derrière la pierre artificielle est légèrement plus stable que derrière la pierre naturelle non recouverte, ce qui pourrait être un avantage si l'on considère le risque de dégradation lié au gonflement de la molasse.

Étant donné la complexité de la dégradation de la pierre sur site, il est important de prendre en compte l'exposition spé-

cifique d'une pierre lorsque la durabilité d'un matériau de réparation est étudiée. C'est pourquoi les données collectées lors de mesures sur site servent à définir au cas par cas les conditions à utiliser lors d'un test de vieillissement accéléré, mais néanmoins représentatif.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [ALO 14a] AL-OMARI A., BRUNETAUD X., BECK K., AL - MUKHTAR M. « Effect of thermal stress, condensation and freezing-thawing action on the degradation of stones on the Castle Of Chambord, France », Environmental Earth Sciences, vol. 71, no 9, 2014, p. 3977-3989.
- [ALO 14b] AL-OMAR I A., BRUNETAUD X., BECK K., AL - MUKHTA R M. « Hygrothermal stress and damage risk in the stones of the Castle Of Chambord, France », International Journal of Civil and Structural Engineering, vol. 4, no 3, 2014, p. 402-418.
- [ALO 14c] AL-OMARI A., BRUNETAUD X., BECK K., AL - MUKHTAR M. « Coupled thermal-hygic characterisation of elastic behaviour for soft and porous limestone », Construction and Building Materials, vol. 62, 2014, p. 28-37. In progress.
- [CAM 13] CAMUFFO D. Microclimate for Cultural Heritage. Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments. Elsevier Science Ltd.
- [FEL 95] FÉLIX C. « Choix de grès tendres du Plateau Suisse pour les travaux de conservation », Conservation et Restauration des Biens Culturels, R. Pancella, École Polytech. Fed. Lausanne, Montreux, 1995, p. 45-71.
- [FUR 83] FURLAN V., GIRARDET F. « Pollution atmosphérique et dégradation de la molasse », Chantiers/Suisse, vol. 14, 1983, p. 989-994.
- [HAL 99] HALL K. « The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions », Geomorphology, vol. 31, 1999, p. 47-63.
- [JIM 08] JIMÉNEZ -GONZÁLEZ I., RODRÍGUEZ-NAVARRO C., SCHERER G. « Role of clay minerals in the physicomechanical deterioration of sandstone », Journal of Geophysical Research, vol. 113, 2008.
- [KUN 97] KÜNDIG R. Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz, Schweizerische Geotechnische Kommission, ETH-Zentrum, Zürich, 1997.
- [LAW 05] LAWRENCE M. « The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air : A Simple Conversion and Applications », Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 86, n° 2, 2005, p. 225-233.
- [SMI 08] SMITH B.J., GOMES-HERAS M., MCCABE S. « Understanding the decay of stone-built cultural heritage », Progress in Physical Geography, vol. 32, n° 4, 2008, p. 439-461.
- [SNE 97] SNETHLAGE R., WENDLER E. « Moisture cycles and sandstone degradation », 1997, Saving our cultural heritage : the conservation of historic stone structures. Dahlem workshop reports.
- [SCH 05] SCHERER G., JIMÉNEZ-GONZÁLEZ I. « Characterization of swelling in clay-bearing stone », 2005, Geological Society of America Special Papers, n° 390, p. 51-61.
- [WAN 08] WANGLER T., SCHERER G. « Clay swelling mechanism in clay-bearing sandstones », 2008, Environ Geol, n° 56, p. 529-534.