

Etude de l'efficacité d'une compresse de dessalement : application dans le cas du tuffeau

Rebecca Rivry², Kévin Beck¹, Sarah Janvier-Badosa¹, Xavier Brunetaud¹, Muzahim Al-Mukhtar¹

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

² ECMH – bureau d'Etudes pour la Conservation des Monuments Historiques, 183 boulevard Jean Mermoz, 94550 Chevilly-Larue, France

RÉSUMÉ. L'altération induite par les sels est l'une des principales formes d'altération des pierres en œuvre. Il est donc nécessaire de réduire la concentration des sels présents dans la pierre afin de pouvoir conserver les matériaux originaux des monuments sans avoir à les remplacer. La méthode de dessalement la plus employée par les restaurateurs est l'application de compresses. L'objectif du travail présenté ici est d'étudier le protocole de mise en place d'une compresse à base d'argile afin d'optimiser son efficacité dans le dessalement d'une pierre poreuse polluée par du chlorure de sodium. Les résultats montrent qu'un pré-mouillage de la surface de la pierre avant application de la compresse conduit à une augmentation de la proportion de sels extraits et donc à améliorer l'efficacité du traitement par la compresse.

ABSTRACT. Salt-induced alteration is one of the main forms of stone deterioration. It is therefore necessary to reduce the concentration of the salts present in the stone in order to preserve the original materials of the monuments without having to replace them. The most desalination method used by restorers is the application of poultices. The aim of the work presented here is to study the protocol for setting up a clay-based poultice in order to optimize its efficiency in the desalination process of a porous stone polluted with sodium chloride. The results show that a pre-wetting of the stone surface before application of the poultice leads to an increase in the proportion of salts extracted, and thus to improve the effectiveness of the treatment by the poultice.

MOTS-CLÉS : Tuffeau, pierre calcaire, altération par les sels, compresse, chlorure, conservation du patrimoine bâti

KEY WORDS: Tuffeau, limestone, salt weathering, poultice, chloride, built heritage conservation

1. Introduction

Les pierres calcaires sont très souvent utilisées en construction que ce soit en pierre de parement ou en maçonnerie. La durabilité de ces matériaux naturels est conditionnée par leurs propriétés intrinsèques (porosité, transfert d'eau, résistance mécanique), mais aussi par l'environnement où ils sont mis en œuvre. En effet, l'altération par les sels est l'une des principales formes d'altération des pierres en œuvre [ICO 10] [AAL 16]. Les sels solubles peuvent avoir diverses origines comme le sol, les mortiers, la pollution atmosphérique, les embruns marins ou bien les sels de déverglaçage. Ils peuvent pénétrer par capillarité dans la porosité des pierres et causer ensuite des dégâts importants (Figure 1). Si, suite à un diagnostic sanitaire, la présence de sel est détectée dans une maçonnerie, il est nécessaire de réduire la concentration des sels présents dans le réseau poreux de la pierre, afin de pouvoir conserver les matériaux originaux des monuments sans avoir à les remplacer. La méthode de dessalement la plus employée par les restaurateurs est l'application de compresses, celle-ci se révèle particulièrement adaptée dans le cas du traitement d'œuvre de grandes dimensions [HER 08]. Elle consiste à extraire les sels présents à l'intérieur d'un substrat poreux (pierre, brique, béton), à l'aide d'une compresse humide, à base d'argile, appliquée en surface. La compresse est maintenue en place pendant une durée de quelques jours à quelques semaines, avant d'être retirée une fois sèche. Le processus de dessalement se déroule en deux étapes : l'eau initialement présente dans la compresse va migrer dans la pierre par capillarité et va dissoudre les cristaux de sels présents dans les pores. Une fois les sels dissous, ceux-ci sont ensuite transférés par des phénomènes d'advection et de diffusion jusque dans la compresse lors de son séchage [BOU 08] [LEB 10] [PEL 10]. L'objectif du travail présenté ici est d'étudier le protocole de mise en place d'une compresse par pré-mouillage de la surface, afin d'optimiser son efficacité dans le dessalement d'une pierre poreuse polluée par du chlorure de sodium.

2.1. étudiée et compresses utilisées La pierre de construction étudiée dans cette étude est le tuffeau blanc. Il est caractéristique des édifices du Val de Loire. Il a notamment été employé pour la construction de nombreux monuments, comme par exemple les célèbres châteaux de la Loire. Cette pierre est un calcaire siliceux (50% de calcite, 40% de silice, et environ 10% de micas et argiles), très poreux. En effet, le tuffeau a une densité apparente de 1,3 avec une porosité totale d'environ 45%, et une gamme de taille de pores très étendue (diamètre d'accès aux pores de 0,003 μm à 20 μm). Il possède une résistance à la compression d'environ 10 MPa à l'état sec, une perméabilité assez forte (10^{-6} m/s), une capillarité importante ($0,4 \text{ g/cm}^2/\text{min}^{0,5}$) ainsi qu'une forte rétention d'eau [BEC 03]. Cette pierre est aussi très sensible aux sels, qui vont entraîner des altérations allant de la présence d'efflorescences en surface jusqu'à d'importantes pertes de matière par désagrégation sableuse ou bien par desquamations en plaques (Figure 1.a). Le tuffeau utilisé pour cette étude est extrait dans la carrière d'Usseau, et fourni par l'entreprise Maquigon.

La compresse employée dans cette étude a été développée par la société Stonevox. Elle est constituée d'une argile (bentonite sodique), d'une zéolite, de fibres de polypropylène et d'eau déminéralisée. Elle est généralement appliquée sur des pierres à l'aide d'une projecteuse ou à la taloche. Elle est maintenue en place pendant plusieurs jours jusqu'à son séchage complet. A la fin du séchage, la compresse est affectée par le développement de fissures de retrait, et dans certains cas, on peut observer par endroit la présence de sels ayant migrés au travers de la compresse jusqu'à la surface évaporante (Figure 1.b). A la fin du dessalement, la compresse est alors enlevée à l'aide d'une brosse.



(a) Ecurie du château de Chaumont-sur-Loire
(photographie : K. Beck)



(b) Compresses de dessalement Stonevox mise en œuvre sur une maçonnerie en pierre

Figure 1. Photographies illustrant un exemple d'altération par le sel sur une pierre en tuffeau (a) et une migration de sels à travers une compresse de dessalement (b)

2.2. Test de dessalement et méthode de caractérisation

Une série d'expérience a été mise en place pour étudier l'influence du mouillage sur l'efficacité de dessalement, et sur la cinétique de séchage de la compresse. La compresse a été appliquée sur une épaisseur de 1 cm, sur des éprouvettes cylindriques (hauteur 4 cm et diamètre 4 cm) en pierre de tuffeau artificiellement contaminées avec du sel NaCl. Les échantillons de pierre ont été préalablement immergés dans une solution de chlorure de sodium saturée à 360 g/L, puis séchés et laissés à stabiliser en enceinte climatique à température et humidité contrôlées (20°C, 65%HR). Les pierres ont été recouvertes de parafilm, et de papier adhésif d'aluminium de façon à créer un séchage unidirectionnel à travers la compresse, afin de recréer les conditions de séchage réaliste de la procédure sur site. L'aluminium a été appliqué de façon à former un gabarit pour l'application de la compresse, il dépassait la surface de la pierre de 1cm. Les pierres ont été maintenues en enceinte climatique durant toute la durée de l'expérience. L'évolution de la cinétique de séchage de la compresse a été suivie par mesure de la variation de la masse du système au cours du temps. Deux types d'échantillons ont été étudiés : des échantillons pré-mouillés et d'autres non. Le volume d'eau de pré-mouillage a été calculé afin que l'eau remplisse la porosité accessible par capillarité sur un centimètre de profondeur.

A la fin de la procédure de dessalement, i.e. au séchage complet de la compresse, les échantillons de pierre ont été découpés, afin d'évaluer au travers d'analyses en chromatographie ionique la répartition des ions chlorures au sein du substrat, en fonction de la profondeur. Dans les deux conditions de mise en place (avec ou sans pré-mouillage), l'efficacité du dessalement a été mesurée par comparaison entre le profil de teneur en ions chlorures d'échantillons témoins pollués, non dessalés. La mesure par chromatographie ionique a été faite selon la norme Italienne NORMAL-13/83-Dosaggio dei sali solubili : une quantité de 200 mg de poudre est mélangé à 20 mL d'eau déionisée ultrapure, puis la solution est ensuite soumise à agitation pendant 72h, à température

3. Résultats et discussions

La figure 2 montre les différentes étapes du test de dessalement. Les pierres polluées par la solution saturée en chlorure de sodium présentent des efflorescences de NaCl sur la surface évaporante (Figure 2.b). Avant l'application de la compresse, un des lots d'échantillons a reçu un pré-mouillage, et la compresse a été appliquée sur une épaisseur de 1 cm (Figure 2.c). Après un peu plus de trois semaines dans l'enceinte climatique (20°C, 65%HR), la compresse sèche se détache de l'échantillon (Figure 2.d).

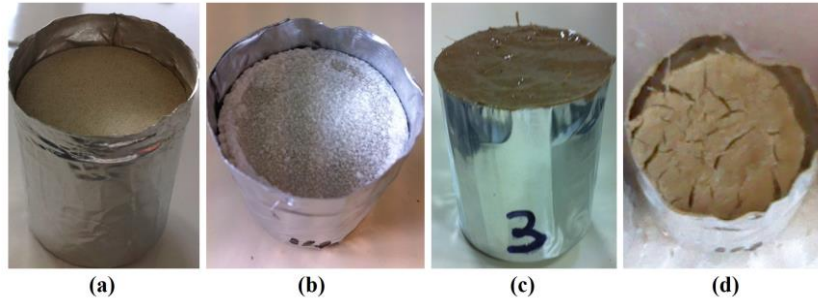


Figure 2. Photographies des échantillons de tuffeau traités par la compresse de dessalement : (a) échantillon de tuffeau de référence, (b) échantillon de tuffeau pollué par du sel NaCl, (c) échantillon pollué après application de la compresse, (d) échantillon avec compresse en fin de séchage

La compresse présente deux morphologies distinctes. Dans le cas de la pierre non pré-mouillée, le début du retrait volumique est visible au bout de 7h après l'application de la compresse, témoignant que la pierre a absorbé une partie de l'eau de la compresse par capillarité. Ensuite, celui-ci augmente pendant les 24h qui suivent l'application, et des fissures de retrait apparaissent progressivement jusqu'à stabilisation de la masse. Le retrait semble ensuite stable au cours du temps. Ces phénomènes témoignent de l'évaporation de l'eau libre présente dans la compresse. Dans le cas de la pierre pré-mouillée, le retrait apparaît au bout de 24h, et reste stable pendant la suite du séchage. La compresse appliquée avec pré-mouillage apparaît d'une couleur plus foncée et présente peu de fissures de retrait visibles en surface. Ces observations peuvent témoigner d'un séchage plus lent de la compresse. Le pré-mouillage semble ralentir le séchage de la compresse, et il semble également constituer un apport d'eau supplémentaire pour amplifier l'advection. La pierre polluée non dessalée est considérée comme représentative de la répartition des sels au sein du matériau, elle permet d'évaluer l'efficacité de dessalement de la compresse. Dans les pierres polluées dessalées, des prélèvements ont été réalisés au cœur de l'éprouvette, afin de s'affranchir des éventuels effets de bord, à 4 niveaux de profondeur par rapport à la surface d'application de la compresse : 0,0-0,5 cm, 0,5-1,5 cm, 1,5-2,5 cm et 2,5-3,5 cm. Les échantillons prélevés ont été broyés et analysés par chromatographie ionique. Les données obtenues en mg/L ont ensuite servi à calculer les proportions massiques en sel NaCl contenues dans le matériau. Les résultats sont présentés à la figure 3.

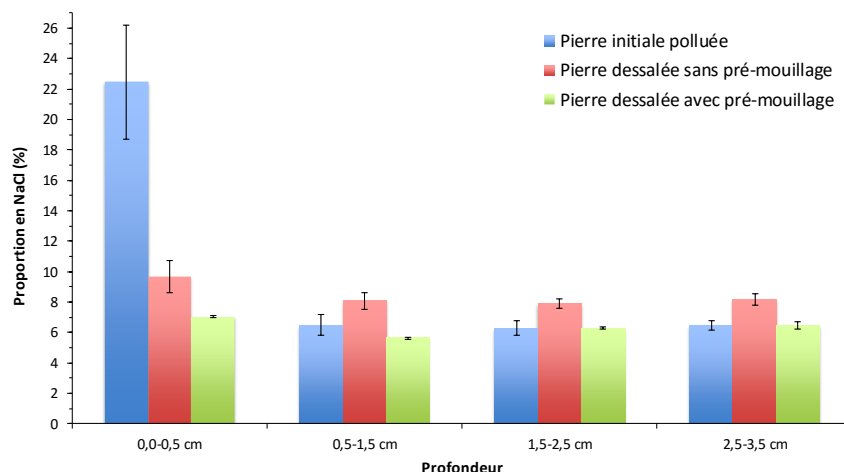


Figure 3. Proportions massiques du chlorure de sodium présent à différentes profondeurs selon les différentes procédures de dessalement appliquées

A l'état initial, la surface d'application est la zone la plus enrichie en chlorure de sodium, la quantité de sel est environ trois fois plus élevée en surface qu'en profondeur où les sels se répartissent de façon homogène, dans des teneurs proches de 6%. Ces résultats sont cohérents, compte tenu de la présence des efflorescences de surface. Pour les deux procédures de mise en œuvre, l'application de la compresse permet de réduire la quantité de sels présents en surface de façon significative sur les 5 premiers millimètres. En effet, l'efficacité de la compresse est plus importante en surface qu'en profondeur car elle est de 57% dans le cas d'une application sans pré-mouillage et de 69% pour une application avec pré-mouillage. A partir de 1 cm de profondeur, on observe une différence de comportement suivant les deux procédures. En effet, l'application sans pré-mouillage a pour effet d'augmenter la proportion de sel en profondeur : au-delà de 1 cm, la proportion en NaCl passe de 6 à 8% quelle que soit la profondeur. L'apport d'eau direct par la compresse a donc tendance à dissoudre les sels, et à les déplacer en profondeur, même si elle les permet de les éliminer de façon significative en surface. L'application avec pré-mouillage permet d'extraire les sels en surface et jusqu'à 1,5 cm de profondeur où la proportion en NaCl passe de 6% à 5%. Au-delà, la proportion en NaCl reste stable, elle n'a ni diminué, ni augmenté.

4. Conclusion

L'étude présentée dans cette communication traite de l'efficacité d'une compresse à base d'argile pour le dessalement d'une pierre calcaire à forte porosité. Elle a mis en évidence l'efficacité de la compresse de dessalement pour le traitement de la pierre sur le premier centimètre. Lors de la procédure de dessalement, l'apport en eau de la compresse au substrat apparaît aussi comme un facteur déterminant dans l'extraction des sels. Il faut que la compresse fournisse suffisamment d'eau pour dissoudre les sels au sein du matériau, mais cet apport d'eau peut aussi avoir un effet négatif en transportant les sels dissous des zones de surface plus loin en profondeur dans la pierre. La procédure d'application avec pré-mouillage apparaît comme la plus efficace dans les conditions de l'étude. Elle permet de dissoudre les sels en profondeur sans que la compresse ne sèche trop rapidement, de réduire de manière significative les proportions de sels sur les deux premiers centimètres, en n'entraînant pas de ré-enrichissement en sel en profondeur. Les perspectives à ce travail portent l'étude textural du réseau poreux de la compresse en cours de séchage comparé à celui de la pierre afin de mieux comprendre les mécanismes de dessalement des compresses et donc d'optimiser leur efficacité.

5. Bibliographie

- [AAL 16] AALIL I., BECK K., BRUNETAUD X., CHERKAOUI K., CHAABA A., M AL-MUKHTAR., « Deterioration analysis of building calcarenite stone in the House of Venus in the archaeological site of Volubilis (Morocco) », *Construction and Building Materials*, vol. 125, 2016, p. 1127-1141.
- [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*, vol. 38, 2003, p. 1151-1162.
- [BOU 08] BOURGÈS A., VERGÈS-BELMIN V., « Comparison and optimization of five desalination systems on the inner walls of Saint-Philibert Church in Dijon, France », *Salt weathering on buildings and stone sculptures: proceedings from the international conference, Copenhagen, 2008*, vol. 22-24, p. 29-40.
- [HER 08] HERITAGE A., HERITAGE A., FUNKE F., VERGÈS-BELMIN V., BOURGÈS A., « How do conservators tackle desalination? An International survey of current poulticing methods », In *Cultural Heritage Research Meets Practice*, 8th European Conference on Research for Protection, conservation and Enhancement of Cultural Heritage, Conference Preprints, Ljubljana, Slovenia, November 10-14, 2008, ed. Jana Kolar and Matija Strlič, 58-59. Ljubljana: National and University
- [ICO 10] ICOMOS-ISCS, *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*, Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre 2010. [En ligne], https://www.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf
- [LUB 10] LUBELLI B., VAN HEES R.P.J., (2010) « Desalination of masonry structures: Fine tuning of pores size distribution of poultices to substrate properties », *Journal of Cultural heritage*, 2010, vol. 11, p. 10-18.
- [PEL 10] PEL L., SAWDY A., VORONINA V., « Physical principles and efficiency of salt extraction by poulticing », *Journal of Cultural Heritage*, 2010, vol. 11, p. 59-67.