

Etude de faisabilité de la consolidation par cimentation biologique sur le tuffeau (procédé Biocalcis)

Kévin BECK¹, Leslie SAPIN², Annette ESNAULT-FILET²

¹ Laboratoire de mécanique Gabriel Lamé - LaMé EA 7494, Université d'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans France

² Soletanche Bachy, 280 avenue Napoléon Bonaparte, 92500 Rueil-Malmaison.

RESUME : Certaines pierres calcaires utilisées pour l'édifice de notre patrimoine bâti présentent des altérations physico-chimiques qui génèrent une décohérence des grains et des fissurations. Le tuffeau est la pierre emblématique des châteaux de la Loire. La principale dégradation de cette pierre tendre et poreuse est la desquamation en plaques, qui peut entraîner une perte de matière sur plusieurs centimètres laissant une surface pulvérulente. La restauration des monuments en tuffeau se fait principalement par remplacement des pierres dégradées. Mais un problème de conservation se pose quand les pierres ont une valeur esthétique ou historique. Il est alors nécessaire d'appliquer un traitement de consolidation pour renforcer la cohésion de la pierre. L'objectif du travail est d'étudier la faisabilité du procédé Biocalcis, qui est une technique de cimentation par biominéralisation déjà appliqué sur les sols granulaires, comme technique de consolidation du tuffeau. Les premiers résultats montrent que le traitement permet une légère augmentation de la résistance mécanique de la pierre de tuffeau sur des pierres de carrière non altérées.

Mots-clefs : restauration, consolidation, patrimoine bâti, tuffeau, biominéralisation

I. INTRODUCTION

Les altérations rencontrées sur les pierres calcaires des monuments de notre patrimoine bâti peuvent générer des pertes de matière, des détachements, des pulvérulences, des desquamations ou des fissurations (ICOMOS, 2008). Ces dégradations sont liées à une diminution forte de la cohésion entre les grains constitutifs de la pierre provoqués par divers phénomènes comme l'effet du gel-dégel, des chocs thermiques, du gonflement-retrait des minéraux argileux ou bien de la cristallisation des sels solubles. Le tuffeau, qui est la pierre emblématique des monuments et des châteaux du Val de Loire, se dégrade principalement sous la forme d'une desquamation en plaques, dont les mécanismes de formation sont encore mal connus. Cette forme de dégradation se manifeste par l'apparition d'une zone feuilletée et pulvérulente à environ un centimètre de la surface de la pierre. Il s'en suit la formation d'une plaque épaisse d'environ un centimètre d'épaisseur se caractérisant par la propagation progressive de fissuration à l'intérieur du matériau. L'altération n'est visible qu'une fois la plaque tombée partiellement. Une fois la plaque tombée, la surface de la pierre est fragile et pulvérulente (Janvier-Badosa et al., 2021). Face à ces

dégradations pouvant entraîner la ruine du monument, la solution la plus couramment utilisée consiste au remplacement des pierres les plus altérées par des pierres neuves. Néanmoins, certaines pierres ont un caractère historique (graffiti à valeur historique, signes lapidaires) ou esthétique particulier (ornement sculpté) qu'il serait préférable de garder. Ainsi se pose le problème de la conservation et des techniques de consolidation des pierres. Il peut être préférable de conserver dans l'état une pierre, même altérée, et de la consolider afin d'augmenter sa durée de vie sur le monument. Il existe plusieurs techniques de consolidation des pierres comme les traitements aux résines époxy ou acryliques, aux fluosilicates, aux silanes, etc. existent et permettent d'augmenter la cohésion des pierres (Siegesmund & Snethlage, 2014). De nouvelles techniques de consolidation, n'utilisant pas de molécules non-minérales, ont été développées comme la biominéralisation (Doehne & Price, 2010). Le procédé Biocalcis®, breveté par l'entreprise Soletanche Bachy, est une technologie industrielle de biocalcification utilisant l'activité de bactéries naturelles pour renforcer les sols en grande profondeur (Esnault-Filet et al., 2017). Son principe repose sur la formation in situ d'un ciment biologique à base de calcite (CaCO_3), généré par une réaction uréolytique (Figure 1). En effet, l'hydrolyse enzymatique de l'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ en présence de bactéries *Sporosarcina pasteurii*, génère des ions carbonate CO_3^{2-} suivie par une précipitation de calcite au contact d'une solution apportant des ions calcium Ca^{2+} . Cette précipitation contrôlée permet de créer des ponts cohésifs entre les grains du sol traité, tout en préservant sa perméabilité. La quantité de calcite formée est ajustée en fonction des performances mécaniques recherchées, et la réaction est complète en quelques heures.

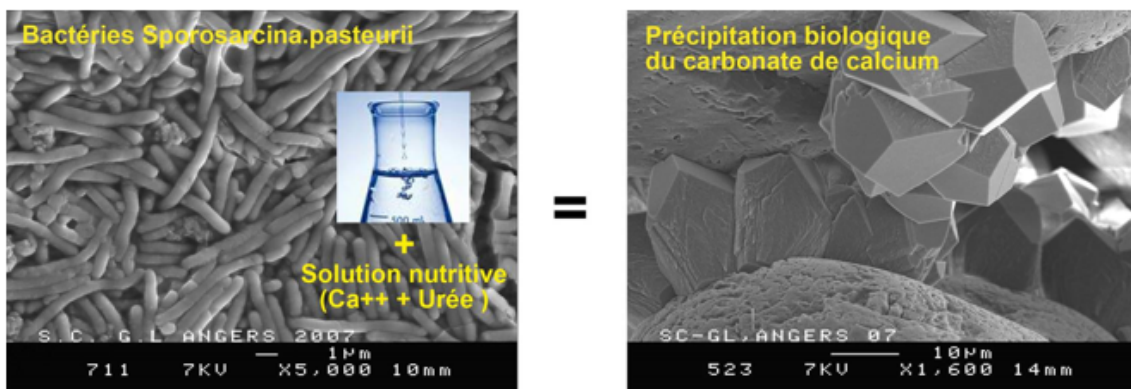


FIGURE 1. Principe de la réaction de biocalcification par bactéries

Validée à différentes échelles, du laboratoire au terrain, cette technologie a d'abord été développée pour la consolidation des sols, notamment la lutte contre la liquéfaction (Semblat et al., 2019), la stabilisation des digues et talus contre l'érosion (Esnault-Filet et al., 2019 ; Cardoso et al., 2024), ainsi que le renforcement des murs de quais et des remblais (Garcia de Oliveira & Esnault-Filet, 2022). En 2020, l'entreprise Soletanche Bachy a adapté cette technologie aux besoins de la conservation du patrimoine en développant le procédé Biocalcis® Patrimoine, spécifiquement conçu pour la régénération des pierres altérées. Cette approche vise à restaurer les caractéristiques des pierres dégradées afin d'éviter leur remplacement. L'application du procédé Biocalcis® au tuffeau pourrait permettre de limiter sa dégradation par desquamation en

favorisant la précipitation in situ de calcite et ainsi éviter que les pierres ne se dégradent davantage. Ce traitement pourrait ainsi contribuer ainsi à réduire la pulvérulence dans les zones fissurées et à améliorer la résistance mécanique de la pierre consolidée, tout en respectant ses propriétés intrinsèques. L'objectif de l'étude présentée ici concerne la faisabilité de la consolidation par cimentation biologique sur le tuffeau par le procédé Biocalcis® et de voir si il est possible d'augmenter la résistance de la pierre par ce type de traitement.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. La pierre étudiée : le tuffeau blanc

Le tuffeau blanc est un calcaire siliceux poreux, utilisé comme matériau de construction dans tout le Val de Loire, d'Orléans jusqu'à Nantes. Cette pierre se définit par une couleur blanche à la texture homogène, à grains fins, et possédant une résistance mécanique caractéristique des pierres tendres, de l'ordre de 5 à 10 MPa (Tableau 1). Le tuffeau est composé de plusieurs phases cristallines telles que la calcite et le quartz, ainsi que d'autres telles que l'opale cristobalite-tridymite, les micas et les minéraux argileux (glauconite, smectite). Le tuffeau se caractérise par une forte porosité de l'ordre de 45%, une taille de pore moyenne d'environ 2 μm avec une distribution de pores multiéchelle allant de 0,003 μm à 100 μm , recouvrant essentiellement une grande mésoporosité avec des pores de diamètre entre 1 et 10 micromètres générant une grande absorption d'eau par capillarité (Beck et al., 2003 ; Beck, 2006). Le tuffeau blanc étudié provient des carrières Maquignon situé à Usseau, dans le département de la Vienne en France.

TABLEAU 1. Propriétés du tuffeau blanc étudié (Beck, 2006)

Composition minéralogique	Calcite : 50%
	Quartz : 10 %
	Opale CT : 30%
	Minéraux argileux : 10%
Masse volumique apparente sèche (g/cm^3)	$1,40 \pm 0,02$
Masse volumique du squelette solide (g/cm^3)	$2,56 \pm 0,01$
Porosité totale (%)	$45,2 \pm 0,6$
Taille de pore moyenne (Hg volume) (μm)	$1,8 \pm 0,1$
Coefficient massique de capillarité ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}^{0.5}$)	$0,36 \pm 0,03$
Coefficient visuel de capillarité ($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$)	$0,96 \pm 0,07$
Résistance à la compression à l'état sec (MPa)	$11,7 \pm 0,4$
Résistance à la compression à l'état saturé (MPa)	$4,8 \pm 0,3$

B. Protocole de consolidation par cimentation biologique

Dans cette étude, des échantillons de tuffeau non altéré issu de carrière ont été traités par le procédé Biocalcis® afin d'évaluer l'efficacité du procédé de consolidation en fonction de différentes concentrations en urée et calcium constituant la solution calcifiante. Le protocole utilisé par le laboratoire de l'entreprise Soletanche Bachy est le suivant :

- **Préparation des échantillons et mise en place du protocole expérimental :**

Des échantillons de tuffeau ont été découpés avec une taille similaire mais avec deux types de géométries : cylindriques (\varnothing 40 mm, hauteur 80 mm) et prismatiques (40 × 40 × 80 mm). Avant traitement, le volume de pores des échantillons est déterminé à partir de la porosité du matériau afin de quantifier le volume de solution nécessaire pour garantir une imprégnation homogène.

Le traitement est réalisé sous vide, selon les étapes suivantes :

1. Installation de l'échantillon : chaque échantillon est placé dans une membrane étanche, avec une entrée et une sortie permettant le passage du fluide de traitement.
2. Mise en dépression : l'ensemble est connecté à une pompe à vide, réglée à 300 mBar, permettant de purger l'air contenu dans les pores du matériau (Figure 2). La mise sous vide initiale permet de maximiser la pénétration de la solution dans la porosité de l'échantillon.
3. Injection de la solution de traitement : une fois la pression stabilisée, la solution de traitement introduite. La solution est un mélange de bactéries *Sporosarcina pasteurii*, et d'une solution calcifiante apportant les ions calcium et l'urée.
4. Imprégnation contrôlée : le volume de solution injecté correspond à 1,2 fois le volume de pores des échantillons, garantissant une répartition homogène du traitement dans la totalité de l'échantillon.
5. Fin du traitement sous vide : la pompe est arrêtée, et l'échantillon est retiré du dispositif.
6. Phase de batch : l'échantillon est laissé en repos pendant 24 heures à l'ambient, permettant l'hydrolyse de l'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, la génération des ions carbonates CO_3^{2-} et la précipitation des cristaux de calcite CaCO_3 au sein de la matrice de la pierre.
7. Préparation aux tests : l'échantillon est rincé à l'eau afin d'éliminer les résidus non fixés. Il est ensuite séché à l'étuve pendant 24 heures avant d'être soumis aux essais mécaniques.



FIGURE 2. Dispositif d'injection sous vide pour l'injection de la solution de traitement

- **Différenciation des traitements :**

Trois concentrations en solution calcifiante (SC) ont été testées afin d'évaluer l'impact de la teneur en calcium et urée sur la performance du traitement :

- C_{basse} : Concentration basse
- C_{moy} : Concentration moyenne ($C_{\text{moy}} = 2 \times C_{\text{min}}$)
- C_{haute} : Concentration haute ($C_{\text{haute}} = 3,3 \times C_{\text{min}}$)

Ces différentes concentrations balaient toute la gamme, du minimum au maximum, des concentrations couramment utilisées par l'entreprise Soletanche Bachy dans les tests de consolidation des sols et des pierres altérées. Les valeurs numériques des concentrations ne sont pas indiquées dans cet article mais seulement les différences de concentrations entre les trois traitements testés. Ces concentrations permettent d'étudier l'effet de la quantité de carbonate de calcium précipité sur les caractéristiques finales du matériau traité, comparé au matériau non-traité.

C. *Méthodes de caractérisation*

Après chaque traitement de consolidation par le procédé Biocalcis®, les échantillons de tuffeau ont été pesés à l'état sec (masse constante après 48 heures dans une étuve à 105°C). La prise de masse des échantillons a ainsi été déterminée par comparaison avec les masses sèches initiales avant traitement. Les échantillons ont été conservés sec à ambiance du laboratoire (20°C, 50%HR) pendant une semaine afin que leur teneur en eau soit à l'équilibre à l'humidité ambiante avant essais. La résistance mécanique des échantillons de pierre traités et non-traités a ensuite été mesurée par deux techniques :

- Mesure de la résistance à la compression simple :

La mesure a été effectuée sur des éprouvettes cylindriques de 40 mm en diamètre et de 80 mm de hauteur, avec une presse INSTRON 4485 avec un capteur de force de 250 kN et le logiciel de pilotage Bluehill3. La vitesse de déplacement de la traverse a été fixée à 0,1 mm/min afin que la rupture se produise entre 5 et 10 minutes selon la norme NF P94-420 (2000). Cet essai permet d'obtenir la résistance maximale à la rupture en compression uniaxiale et le module élastique.

- Mesure de la résistance au percement (DRMS) :

La mesure a été effectuée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 40 × 40 × 80 mm avec un dispositif nommé DRMS Cordless (Drilling Resistance Measurement System - DRMS), produit par Sint Technology (Figure 3). Le principe de mesure est de mesurer la force de percement (en N) d'un foret diamanté pénétrant dans un matériau avec une vitesse de rotation constante et une vitesse de pénétration constante (Del Monte et al., 2020). Le foret utilisé a un diamètre de 5 mm. La vitesse de rotation utilisée est de 600 rpm. La vitesse de pénétration utilisée est de 10 mm/min. La mesure de la force se fait avec une précision de 0,1 N sur une distance de 30 mm. La force mesurée dépend du diamètre du foret utilisé, de la vitesse de rotation et de la vitesse de

pénétration. La mesure est essentiellement comparative afin de voir l'effet du traitement sur le matériau et de vérifier que le traitement a agi sur la totalité du volume de l'échantillon.

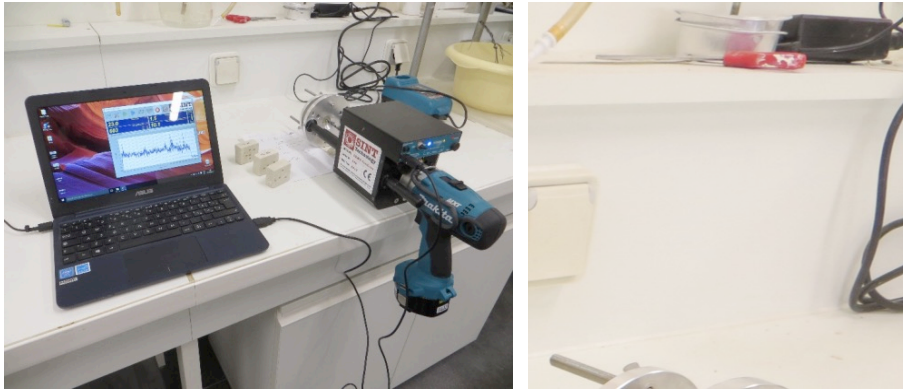


FIGURE 3. Dispositif de mesure de résistance au percement DRMS (Drilling Resistance Measurement System)

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le tableau 1 présente la prise de masse des échantillons ainsi que la synthèse de tous les résultats des mesures réalisées sur les éprouvettes traitées par le procédé Biocalcis® comparé aux éprouvettes non-traitées. La comparaison des masses sèches des éprouvettes traitées et non-traitées montre une prise de masse de l'ordre de 1% après le traitement indiquant la calcification du matériau dans sa porosité. Le traitement à la concentration basse amène à une prise de masse de 0,7%. La concentration moyenne amène à une prise de masse de 1,3%, ce qui est logique car cette concentration est le double de la première. La concentration haute amène à une prise de masse de 1,7%, alors que cette concentration est plus du triple de la première. Cela met en évidence un effet de saturation dans la réaction de biominéralisation, où une augmentation de la concentration de la solution ne se traduit pas par une amélioration significative de la prise de masse du matériau. La figure 4 présente les photographies des échantillons après traitement Biocalcis® aux trois concentrations étudiées, en comparaison de l'échantillon témoin de référence. On constate aucun changement de couleur ou de texture apporté par le traitement. La consolidation par biominéralisation n'affecte pas l'aspect visuel du matériau.

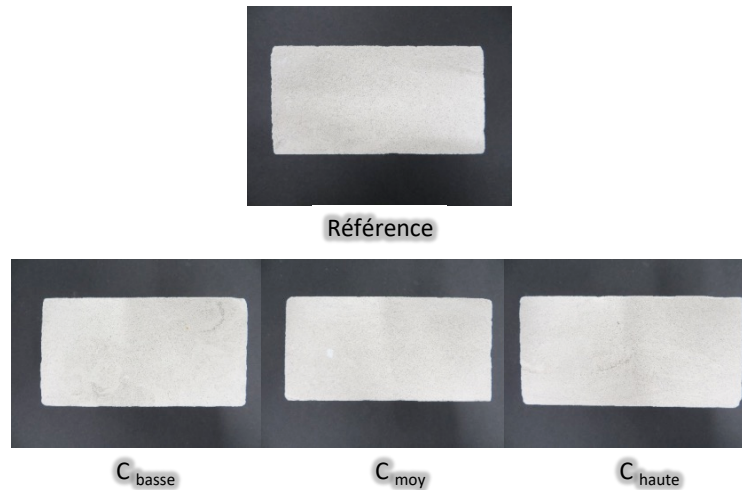


FIGURE 4. Photographie des échantillons après traitement Biocalcis®

La figure 5 présente les courbes contrainte-déformation les plus représentatives des résultats des essais de compression simple pour les traitements par biocalcification à trois concentrations différentes en comparaison à la pierre non-traitée. Ces courbes ont une allure typique pour une pierre calcaire tendre et poreuse comme l'est le tuffeau. Après une première partie à faible pente liée à l'écrasement de la porosité, l'évolution de la contrainte appliquée suivant la déformation du matériau suit une variation linéaire dont la pente permet le calcul du module d'élasticité entre 30% et 70% de la résistance maximale. Le module élastique est calculé par le logiciel par la mesure des déformations liée au déplacement de la traverse de la presse. Les valeurs sont donc sous-estimées par rapport à des modules élastiques du matériau liés à une mesure directe des déformations par jauge ou par corrélation d'images. Néanmoins, ces valeurs sont comparatives. Il s'en suit un début d'endommagement du matériau conduisant finalement à la rupture. Les valeurs de résistances de l'ordre de 7-8 MPa correspondent bien aux valeurs du tuffeau pour une humidité du matériau correspondant à l'air ambiant ($H_r=50\%$). En effet, le tuffeau étant une pierre hygroscopique et très sensible à l'eau, les résistances mécaniques baissent beaucoup en fonction de l'humidité de l'air ambiant (Beck, 2006). C'est pourquoi les tests mécaniques ont été fait à l'équilibre avec l'humidité de l'air ambiant, et non à l'état parfaitement sec ou saturé, afin de représenter l'état du matériau dans des conditions réalistes. La figure 6 présente les courbes de force de perçement les plus représentatives des résultats au DRMS. Ces courbes sont très bruitées en raison de la sensibilité du capteur de force et de la faible valeur de la force de perçement pour le tuffeau qui est une pierre tendre et poreuse. Néanmoins, on observe que les mesures oscillent autour d'une valeur moyenne constante, que ce soit pour la pierre non-traitée comme pour les éprouvettes traitées avec les trois concentrations différentes. Ceci prouve que le traitement a eu un effet homogène sur la totalité des échantillons car il n'est pas observé de gradient avec un profil où la résistance au perçement serait plus forte en surface plutôt qu'à cœur. Par la suite, la moyenne de la force de perçement mesurée sur l'ensemble de la pénétration sur 30 mm sera calculée afin de comparer les échantillons traités de ceux non-traités. Les valeurs de la résistance au perçement ainsi que les valeurs de la résistance maximale à la rupture et du module élastique pour chaque lot d'échantillons sont présentées au tableau 1.

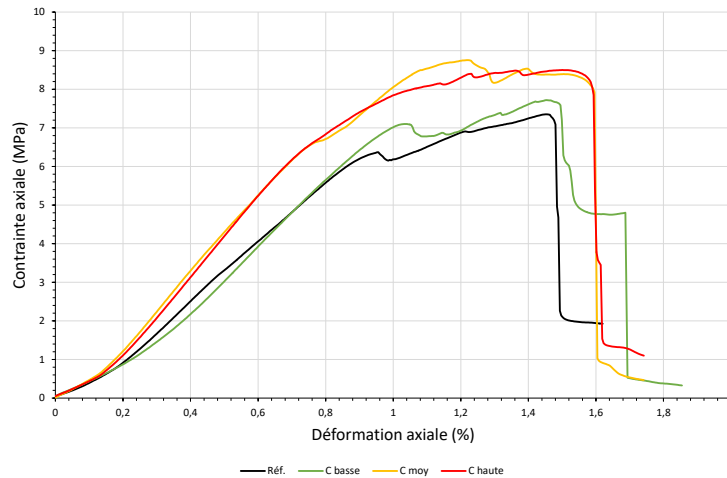


FIGURE 5. Courbes Contrainte-Déformation des éprouvettes lors d'un essai de compression simple

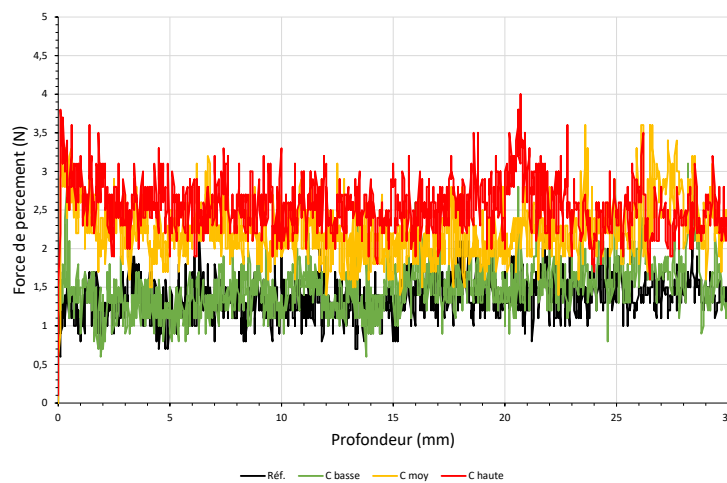


FIGURE 6. Courbes de force de perçement des éprouvettes lors d'un essai au DRMS

L'analyse des résultats conduit à ce que les informations mécaniques données par la mesure de la résistance à la compression simple et par la mesure de la résistance au perçement sont cohérentes entre elles (Tableau 2). En effet, malgré une prise de masse de 0,7%, le traitement à la concentration basse amène à une augmentation des performances mécaniques négligeables. La résistance à la compression et le module élastique du matériau traité à ce premier niveau de concentration, ainsi que la force de perçement, sont totalement comparables aux valeurs des échantillons non-traités. On observe une différence de comportement à partir du traitement avec la deuxième concentration notée C_{moy} . En effet, la résistance mécanique à la compression et le module élastique sont augmentés d'environ 15% par rapport aux échantillons de référence. L'amélioration des performances mécaniques est même plus visible au niveau de la résistance au perçement DRMS où les valeurs de résistance ont augmenté de plus de 25%. Avec la troisième concentration testée, correspondant à la valeur haute des concentrations utilisées en pratique par l'entreprise Soletanche Bachy, on ne constate pas de réelle amélioration des performances

mécaniques comparé aux résultats du traitement par la deuxième concentration notée C_{moy} , confirmant l'effet de saturation du traitement déjà suspecté dans les mesures de prise de masse. Si nécessaire, il serait peut-être possible d'augmenter la résistance en augmentant le taux de calcite précipité en multipliant les séquences d'injection de la solution à la concentration C_{moy} .

TABLEAU 2. Résultats des mesures réalisés sur les éprouvettes traités Biocalcis® et non-traitées

		Prise de masse Δm (%)	Résistance au percement (N)	Résistance à la compression (MPa)	Module élastique (MPa)
Tuffeau non-traité	Référence	-	$1,4 \pm 0,1$	$7,3 \pm 0,6$	790 ± 80
	C_{basse}	$0,73\% \pm 0,02\%$	$1,5 \pm 0,5$	$7,7 \pm 0,7$	880 ± 100
Tuffeau traité	C_{moy}	$1,35\% \pm 0,06\%$	$2,0 \pm 0,2$	$8,7 \pm 0,8$	980 ± 100
	C_{haute}	$1,74\% \pm 0,05\%$	$2,2 \pm 0,3$	$8,5 \pm 0,8$	1030 ± 120

IV. CONCLUSION

Le traitement de consolidation par biominéralisation est actuellement employé dans le renforcement des sols et des pierres poreuses. Dans cette étude de faisabilité, des échantillons de tuffeau ont été traités avec le procédé Biocalcis® avec trois concentrations de solutions différentes correspondant aux valeurs basse, moyenne et haute des concentrations habituellement utilisées par l'entreprise Soletanche Bachy dans ses traitements. Les résultats montrent que le traitement réalisé permet effectivement d'augmenter la masse du tuffeau d'environ 1%, lié à la quantité de carbonate de calcium précipité dans les pores de la pierre. Ce traitement permet aussi d'augmenter légèrement la résistance mécanique de la pierre non altérée d'environ 15-20 %, démontrant l'effet bénéfique de la cimentation biologique, tout en préservant son aspect visuel. L'étude des trois concentrations montre que la concentration basse de la gamme des concentrations n'apporte aucune amélioration des performances mécaniques ainsi qu'un effet de saturation d'augmentation des performances entre les concentrations moyenne et haute. Le traitement par concentration moyenne apporte les meilleurs résultats rapportés à la quantité de solutions à apporter et donc au coût du traitement.

Ces conclusions positives permettent donc d'envisager une suite à ce travail par l'étude de l'effet de ce traitement par biocalcification sur des échantillons de tuffeau altéré provenant de monuments et fragilisés par des desquamations. En effet, la desquamation en plaques du tuffeau se caractérise par l'existence d'une zone micro-fissurée et peu cohésive à l'intérieur de la pierre altérée. Cette zone très poreuse et donc très perméable pourrait être consolidée par injection permettant de limiter la dégradation et d'éviter ainsi la chute des plaques.

REFERENCES

Beck, K., Al-Mukhtar, M., Rozenbaum, O., Rautureau, M., (2003). Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire valley-France. *Building and Environment*, 38(9), 1151–1162. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00074-X)

Beck, K., 2006. Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. Thèse de doctorat de l'université d'Orléans, 226 p.

Cardoso, R., Oliveira, M., Cruz, M., Gonzalez, I., Rodrigues, A. T., Anjos, B., Sapin, L., & Esnault-Filet, A. (2024). Biocementation treatment of a Portuguese motorway slope to prevent ravine formation. *Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024 – Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*, 2148-2151. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-406>

Collectif, ICOMOS-ISCS, 2008, Glossaire illustré des formes d'altération de la pierre, coordonné par Vergès-Belmin V., Traduction en Français par Bromblet P., Vallet J.M. et Vergès-Belmin V. (https://openarchive.icomos.org/id/eprint/434/1/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf)

Del Monte, E., Boschi, S., Vignoli, A., 2020. Prediction of compression strength of ancient mortars through in situ drilling resistance technique. *Construction and Building Materials*, 237, 117563. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117563>

Doehne, E., and Price, C.A., 2010. *Stone Conservation: an overview of current research*, 2nd ed., 158 p., ISBN 978-1-60606-046-9, Getty Conservation Institute publications, 2010.

Esnault-Filet, A., Gutjahr, I., Sapin, L., Lépine, L. (2017). Biocalcis®, le renforcement des sols par cimentation biologique. *Travaux*, 933, 100-106.

Esnault-Filet, A., Gutjahr, I., Garandet, A., Viglino, A., Béguin, R., Sibourg, O., Monier, J.-M., Martins, J., Oxarango, L., Spadini, L., Geindreau, C., Emeriault, F., & Castanier Perthuisot, S. (2019). *BOREAL, Bio-renforcement des ouvrages hydrauliques en remblais. Dignes Maritimes et Fluviales de Protection contre les Inondations*, 2019. DOI : 10.5281/zenodo.2532995. <https://zenodo.org/records/2532995>

Garcia de Oliveira, V., & Esnault-Filet, A. (2022). De la biominéralisation pour sécuriser le Pont René Thinat à Orléans. *Travaux*, 982, 66-68.

Janvier-Badosa, S., Beck, K., Balawi, M., Ternoy, M., Janvier, R., Brunetaud, X., 2021. Analysis of spalling in tuffeau: case study of the castles of Chambord and Chaumont-sur-Loire in France. *5th International SWBSS conference, Delft 2021, 22-24 septembre 2021, Delft, Netherlands*, ISBN 978-94-6366-439-4, p. 327-335.

Norme AFNOR, 2000. Référence NF P94-420. Détermination de la résistance à la compression uniaxiale. 7 p.

Semblat, J.-F., Reiffsteck, P., Foerster, E., Lopez-Cabellero, F., Canou, J., Esnault-Filet, A., & Voldoire, F. (2019). Caractériser et prévenir la liquéfaction des sols sous les ouvrages : le projet ISOLATE. *10ème Colloque National AFPS 2019 – Strasbourg*. (<https://cnrs.hal.science/hal-02442856v1>)

Siegesmund, S., and R. Snethlage, R., (eds.), 2014. *Stone in Architecture*, 5th ed., 550 p., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45155-3>, ISBN 978-3-642-45154-6, Springer Heidelberg, 2014.