

Caractérisation chemo-mécanique des mortiers de chaux : Application à la conservation-restauration du patrimoine bâti.

Le Centre Interdisciplinaire de Conservation et de Restauration du Patrimoine (CICRP, ministère de la Culture) et le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA, UMR CNRS 7031) collaborent depuis de nombreuses années pour caractériser les matériaux patrimoniaux en vue de comprendre les mécanismes de leur dégradation à des fins de conservation. Plus largement incluse dans un projet national Equipex+ ESPADON (En Sciences Du Patrimoine, L'Analyse Dynamique des Objets anciens et Numériques), cette collaboration a donné lieu à des avancées sur la compréhension des mécanismes de dégradation du marbre de Carrare [1] et la définition de l'état de conservation des statues sculptées dans ce matériau [2]. En parallèle, le CICRP est de plus en plus régulièrement sollicité pour définir précisément la formulation des mortiers de chaux mis au jour lors de fouilles archéologiques et de proposer celles qui doivent être mises en œuvre lors de chantier de restauration. Une poursuite de la collaboration avec le LMA est donc envisagée afin d'améliorer la compréhension du lien entre formulation, propriétés mécaniques et durabilité des mortiers de chaux.

Depuis ses premières utilisations au cours de l'antiquité grecque et romaine, le mortier de chaux est devenu un élément incontournable de l'architecture pré-moderne. En effet, ce matériau composite (mélange de chaux, d'agréats et d'eau) assure la cohésion entre les pierres, la répartition des charges entre les assises et l'interface entre la maçonnerie et son environnement. Bien que relativement simple, la formulation des mortiers de chaux a évolué au cours du temps et en fonction de l'usage. En effet, les agrégats inertes (sables siliceux ou calcaires) classiquement employés ont ponctuellement été remplacés par des agrégats réactifs (tuileaux, pouzzolanes, pierres ponce, etc.) afin d'améliorer les propriétés mécaniques du mortier (*opus caementicium*) mais aussi d'imperméabiliser les installations hydrauliques telles que les citernes (Fig. 1A), les canalisations ou les thermes. L'adjonction d'agréats réactifs entraîne en effet une réaction dite pouzzolanique [3] à l'interface avec la chaux. En présence d'eau, cette dernière réagit avec la silice et l'alumine présentes à la surface des agrégats pour former des silicates et aluminates de calcium hydratés (C-A-S-H). La prise de ces mortiers est donc qualifiée d'hydraulique, à l'inverse de la prise aérienne de la chaux par carbonatation. Cependant, l'impact de la nature des agrégats réactifs et de leur distribution granulométrique sur l'extension et la qualité de la réaction pouzzolanique reste peu compris [4]. Notamment, l'évolution mécanique induite au cours de la prise n'a jamais été étudiée depuis l'échelle de l'auréole de transition entre la chaux et les agrégats réactifs jusqu'à celle du mortier.

A ce titre, des recherches récentes [5] mettent en évidence le rôle prépondérant des interfaces microstructurales dans la signature acoustique et vibratoire des bétons à base de ciment moderne. Lorsqu'une onde acoustique se propage dans un milieu hétérogène tels que les bétons ou les mortiers, et que la longueur d'onde correspond à l'échelle des hétérogénéités, elle se trouve diffusée dans tout l'espace, avec plus ou moins d'intensité dépendant de la nature de l'interface entre la matrice et l'inclusion. Par ailleurs, selon l'amplitude des ondes, ces interfaces vont produire des effets non linéaires induits par des phénomènes de friction, ouverture fermeture, adhésion, etc. permettant également d'informer sur la nature de ces contacts locaux. Ainsi, différentes méthodes acoustiques (linéaires et non-linéaires) seront mises en œuvre afin d'améliorer la compréhension des variables contrôlant la réaction pouzzolanique et donc de postuler sur la durabilité des mortiers de chaux.

Aujourd'hui, les mortiers de chaux mis en œuvre sur les enduits d'édifices situés en bord de mer présentent des états de dégradation très avancés (Fig. 1B). Ces désordres résultent des

cycles de cristallisation/dissolution des sels solubles apportés par les embruns et entraînent d'importants travaux de restauration. Dans le cadre d'opérations récentes (château d'If à Marseille, citadelle de Bonifacio), l'emploi de formulation de mortiers d'enduits traditionnels à base de chaux et d'agréats inertes a provoqué une réapparition rapide des désordres, contraignant les maîtrises d'ouvrages à prévoir de nouvelles opérations. De ce fait, la définition de formulation de mortiers de restauration respectueux des techniques traditionnelles mais plus durables s'avère cruciale. Pour cela, le projet se propose d'évaluer la durabilité des mortiers de chaux adjuvantés d'agréats réactifs utilisés dans l'antiquité mais aussi de tirer profit des liants (chaux hydraulique naturelle) et adjuvants (réteneur d'air, inhibiteur ou convertisseur de sels, hydrofuge de masse, etc.) plus modernes.

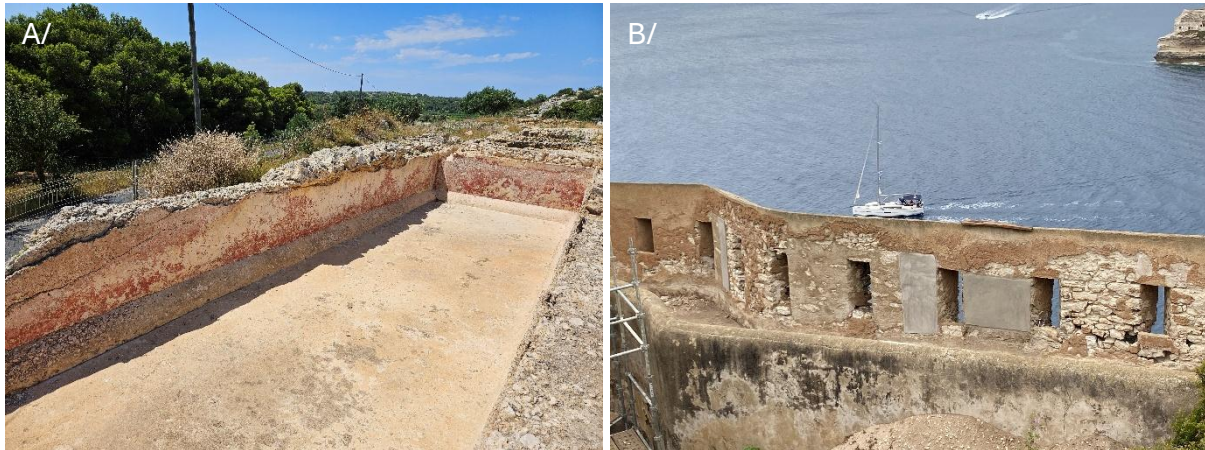


Figure 1 : A/ Citerne romaine recouverte d'enduits formulés à base de chaux et de fragments de tuileaux (Site archéologique de l'île Saint Martin à Gruissan). B/ Etat de dégradation des enduits de la citadelle de Bonifacio avant restauration.

Afin de répondre aux problématiques de ce projet, l'approche méthodologique suivante sera mise en œuvre :

1. Recherche bibliographique sur les formulations des mortiers de chaux antiques et caractérisation physico-chimique d'un corpus d'échantillons collectés dans le cadre de fouilles archéologiques (Gruissan, Olbia, Nabeul, etc.).
2. Formulation de mortiers analogues aux mortiers antiques à base de chaux aérienne mélangée avec différents types d'agréats inertes (sable quartzeux) et réactifs (pouzzolane, ponce, tuileau), et de mortiers de restauration à base de chaux aérienne, de chaux hydraulique naturelle, d'agréats réactifs et d'adjuvants modernes.
3. Evaluation chemo-mécanique des mortiers :
 - a. Suivi de la prise (vitesse, cinétique) des différentes formulations à l'aide de cellules ultrasonores UltraTest ;
 - b. Analyse physico-chimique du liant (analyse thermique différentielle) et des interfaces liant/agréats (spectroscopie Raman, microscopie électronique à balayage couplée à la spectroscopie à énergie dispersive) ;
 - c. Caractérisation des propriétés pétrophysiques (porosité, capillarité, etc.), mécaniques (essais normalisés de résistance en compression et en flexion, mesure de la dureté de surface) et acoustiques (vitesse de propagation

ultrasonore, atténuation, diffusion de l'énergie, spectroscopie de résonance non-linéaire) ;

4. Evaluation de la durabilité des mortiers :

- a. Définition de cycles de vieillissements en conditions extrêmes (cyclages thermo-hygriques, enceinte à brouillard salin) ;
- b. Suivi de l'évolution des réponses linéaires (vitesse de propagation ultrasonore, atténuation, diffusion de l'énergie) et non-linéaires (NRUS) au cours des cycles de vieillissement ;
- c. Mise en œuvre des formulations les plus durables dans le cadre de tranches expérimentales de chantiers de restauration d'enduits.

En regroupant toutes les données acquises au cours de ce projet, il sera possible de relier la signature acoustique d'un mortier de chaux mesurée *in situ* à une formulation identifiée en laboratoire. Cela permettra vraisemblablement de proposer une méthode de caractérisation non-destructive et d'orienter les choix pour la restauration du patrimoine en place.

Financement : Ecole doctorale Sciences pour l'Ingénieur (ED353) + Contrat de Mission d'Enseignements (facultatif)

Profil recherché : Ingénieur ou Master2 en Matériaux, Mécanique, Acoustique, Génie Civil, avec de bons résultats académiques (en moyenne > 12) sur les 3 dernières années

Lieu : entre le CICRP et le LMA à Marseille, avec d'éventuels déplacements sur sites.

Contacts : Manda Ramaniraka (manda.ramaniraka@univ-amu.fr) / Cédric Payan (cedric.payan@univ-amu.fr) / Jérémie Berthonneau (jeremie.berthonneau@cicrp.fr) / Philippe Bromblet (philippe.bromblet@cicrp.fr)

Références bibliographiques

- [1] M.-L. Chavazas, P. Bromblet, J. Berthonneau, J. Hénin, C. Payan, Impact of relative humidity variations on Carrara marble mechanical properties investigated by nonlinear resonant ultrasound spectroscopy, *Construction and Building Materials* 431 (2024)
- [2] M.-L. Chavazas, J. Berthonneau, C. Payan, E. Debieu, P. Bromblet, 3D damage imaging of Carrara marble sculptures by acoustic tomography coupled to photogrammetry, *Journal of Cultural Heritage* 73 (2025)
- [3] M. D. Jackson, S. R. Chae, S. R. Mulcahy, C. Meral, R. Taylor, P. Li, A.-h. Emwas, J. Moon, S. Yoon, G. Vola, H.-R. Wenk, P. J. M. Monteiro, Unlocking the secrets of Al-tobermorite in Roman seawater concrete, *American Mineralogist* 98 (2013)
- [4] A. Moropoulou, K. Polikreti, A. Bakols, P. Michailidis, Correlation of physicochemical and mechanical properties of historical mortars and classification by multivariate statistics, *Cement and Concrete Research* 33 (2003)
- [5] M. Ramaniraka, S. Rakotonarivo, C. Payan, V. Garnier, Effect of Interfacial Transition Zone on diffuse ultrasound in thermally damaged concrete, *Cement and Concrete Research* 152 (2021)