

Caractéristique du béton de chaux utilisé dans les fondations subaquatiques avant 1900

Myriam DUC¹, Alain LE KOUBY¹, Hajar HAWLI¹, Olivier ASTIER², Chi Wei CHEN²

¹ GERS-SRO, Université Gustave Eiffel, 5 boulevard Newton, 77454 Marne-la-Vallée, France

² SNCF Réseau, 15 /17 rue Jean-Philippe Rameau, CS 80001, 93 418 La Plaine Saint-Denis, France

RESUME

Les fondations des piles de ponts de chemin de fer construits avant 1900 sont généralement réalisées en utilisant des bétons de chaux, selon une formule ou une méthode de mise en œuvre non précisées à moins d'avoir des archives de l'époque. Or ces bétons anciens en position immergée/enterrée évoluent au cours du temps sous l'effet du lessivage par l'eau du site mais aussi via les réactions pouzzolaniques lentes et une possible carbonatation voire une altération biologique. Cela se traduit sur les carottes de site caractérisées dans cet article par la présence de zones désagrégées (état granulaire) qui peuvent aboutir à la formation de cavités dans la structure. La présente étude interroge le processus de dégradation des bétons de chaux en condition immergée et l'origine des 25% de carbonates CaCO_3 observés. La présence d'hydrates cimentaires sous forme de feuilletés est également observés au MEB mais avec une absence de portlandite confirmée par DRX. La porosité des échantillons de site mesurée par porosimétrie par intrusion de mercure ne met pas clairement en évidence des variations de porosité dans le mortier de chaux du béton alors que des essais de nanoindentation montrent que les hydrates cimentaires présents seraient possiblement dans un état lessivé.

Mots-clefs fondation, béton de chaux, processus de dégradation, méthode de caractérisation, carbonatation en conditions immergées

I. INTRODUCTION

En France, plus de 70% des fondations de ponts sont potentiellement dégradés et nécessitent une surveillance. Or, sur les 545 structures ferroviaires en Île-de-France, 222 utilisent des techniques de maçonnerie avec du béton de chaux (source interne SNCF Réseau) et l'environnement subaquatique des fondations des ponts reste la cause principale de leur dégradation. Un tel phénomène est amplifié par le changement climatique avec des épisodes plus sévères de sécheresses et d'inondations fluviales, ce qui induit au final des réparations coûteuses via des méthodes d'injection. Une meilleure connaissance des bétons de chaux historiques et leur mode de dégradation est donc nécessaire pour mieux anticiper les réparations sur l'ouvrage. Or des données précises sur les matériaux utilisés au XIX^{ème} siècle sont manquantes, contrairement au béton de chaux des Romains assez bien décrit dans la littérature (Cuevas et al., 2023). Avec leur mélange de chaux et de pouzzolane (cendres volcaniques) selon le traité de Vitruve « De Architectura » (<https://remacle.org/bloodwolf/erudits/Vitruve/livre2.htm#5>), ces liants ont montré

une étonnante durabilité en perdurant jusqu'à notre époque dans des aqueducs, bâtiments publics ou fondations d'ouvrages en mer. Cependant pour les mortiers plus récents de bâtiments historiques ou de fondation, les compositions très variables de ces mortiers incorporant des agrégats d'origine naturelle ou anthropique (variabilité des ressources locales, des formulations et des modes de mise en œuvre) expliquent une durabilité bien plus variable lorsque le béton est soumis à des environnements plus ou moins agressifs (variation de température, nombre de cycles sec/humide, phénomène d'érosion, salinité de l'environnement marin) (Borges et al., 2014).

Concernant les mortiers de chaux dans des murs en contact avec l'air, la carbonatation du béton de chaux aérienne semble contribuer à l'augmentation de la résistance en compression selon Apostolopoulou et al. (2021), ce qui favorise par ailleurs la capacité du matériau à s'auto-cicatriser selon Elert et al. (2002). Or contrairement à l'environnement aérien, l'environnement subaquatique n'a pas fait l'objet d'études approfondies à l'exception de quelques structures anciennes dans des ports en contexte marin ou de quelques maçonneries anciennes de tunnels (<https://unews.utah.edu/roman-concrete/>; Brandon et al. (2005)).

En outre, si l'injection de coulis de chaux semble aujourd'hui largement utilisée par les professionnels pour la réparation des bâtiments du patrimoine culturel, les liants hydrauliques modernes restent recommandés par l'AFTES (2006) pour la réparation des structures souterraines fissurées ou contenant des vides pluri-décimétriques comme observés sur les fondations de bétons de chaux (Guide, 1980). Une mauvaise compatibilité du liant de réparation avec le béton de chaux sur site choisi initialement en raison de son élasticité, peut être à l'origine de pathologies de seconde génération. Aussi les interactions entre coulis de réparation injecté et béton de chaux dont la nature doit être identifiée est requise pour assurer des réparations durables.

L'objectif de cet article est donc de caractériser le béton de chaux d'une fondation datant de 1850 et de mettre en évidence son potentiel état de dégradation. Sans connaître la formulation initiale mise en œuvre, des hypothèses sont émises sur la nature de la chaux utilisée ainsi que l'origine des carbonates observés par diffraction des rayons X (DRX). Le microscope électronique à balayage (MEB) complété par des mesures de porosité par intrusion de mercure permet d'observer la microstructure du béton et d'identifier des phases en s'inspirant des faciès observés dans les bétons modernes. Une éventuelle porosité créée par dissolution des phases cimentaires basiques au contact de l'eau de rivière est également recherchée. Enfin, la nanoindentation est utilisée pour détecter des variations de module élastique E à l'échelle des phases hydratées qui composent la pâte du mortier de chaux, phases potentiellement lessivées à divers degrés sur le long terme en milieu immergé.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Des carottes ont été extraites des fondations d'un viaduc ferroviaire du Sud-Est de la France. Construit en maçonnerie en 1850, cet ouvrage repose sur des fondations semi-profondes en béton cyclopéen (environ 4m x 6 m x 4m de profondeur), entourées de pieux en bois et de blocs de roche. Le massif de béton de chaux une fois mis en place se positionne en dessous du niveau de la rivière et donc en position immergé (saturé) du moins pendant les périodes de hautes et basses eaux

habituelles de la rivière. Les prélèvements sous forme de forages carottés sont soit verticaux, soit inclinés (Figure 1).

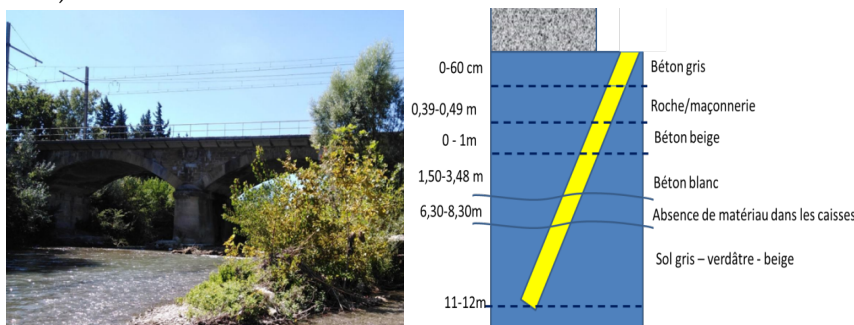


FIGURE 1. Photo du viaduc où les échantillons ont été prélevés et d'une carotte type prélevée sur le site

Les carottes se composent d'une couche de béton gris (noté « Gris ») en surface sur 60 cm puis d'une couche de roche calcaire poreuse ocre (calcaire du Gard), d'une couche de béton apparaissant « beige » (noté « Beige ») à l'extérieur de la carotte (la couleur provient d'une pollution de la surface de la carotte lors du forage par la boue de la roche formée par l'outil de coupe) et d'une couche de béton blanc (noté « blanc ») allant jusqu'au sol de fondation à grains fins (argileux) de couleur verdâtre (noté Sol).

Les carottes apparaissent « saines » (peu ou pas de microfissures ou de macroporosité visibles à l'œil nu sur les tronçons compacts collectés) mais elles sont cependant entrecoupées de zones granulaires où seuls les graviers du béton restent présents avec un peu de mortier accroché à leur surface (Figure 1). On associe ces zones qui peuvent atteindre plusieurs décimètres, à une altération par lessivage (dissolution) du béton. Le mode de forage via l'introduction d'eau ou d'un fluide de forage a pu également entraîner les résidus les plus fins des zones altérées, ne laissant que les graviers.

Les échantillons prélevés en avril-mai 2023 ont été stockés dans des caisses en plastique (non hermétiques) où les carottes ont séché sous air jusqu'à l'analyse en laboratoire à partir de mars 2024. Les analyses ont été réalisées sur des prélèvements ponctuels de mortier réalisés sur plusieurs carottes dans les différentes couches décrites précédemment (gris, beige, blanc et sol) auxquelles s'ajoute un prélèvement dans une inclusion de chaux mal mixée (notée inclusion).

Seuls quelques résultats types sont montrés dans cet article et une statistique étendue serait nécessaire pour valider les résultats et les généraliser à tous les sondages effectués sur les différentes piles du site.

B. Méthodes expérimentales

Analyses minéralogiques. La diffraction de rayons X (DRX) a été réalisée sur les matériaux broyés à 80 μm à l'aide d'un diffractomètre Bruker D8 Advance (configuration θ - θ , anode en cobalt, $E = 35 \text{ kV}$, $I = 40 \text{ mA}$, sans monochromateur, détecteur LynxEye, acquisition à un taux de 1 s par $0.01^\circ 2\theta$ entre 3° et $70^\circ 2\theta$) couplé au logiciel EVA (Bruker) avec la base de données minéralogiques ICDDpdf-2. EVA a permis l'identification des minéraux et leur quantification a été réalisée en utilisant la méthode Rietveld (logiciel TOPAS 4.2, Bruker). Les phases amorphes ont été quantifiées en utilisant un étalon externe soit 10 % de corindon ajoutés à la poudre de mortier à quantifier.

Porosimétrie par intrusion de mercure (PIM). Les mesures sont réalisées avec un porosimètre Autopore IV de chez micromeritics. L'échantillon lyophilisé (environ 1 cm^3) est injecté de mercure sur lequel des pressions croissantes sont appliquées de 0,003 MPa à 413 MPa (10/30 s par pas de mesure) pour explorer les pores jusqu'à environ 3 nm de diamètre d'entrée. Le volume cumulé de mercure introduit dans l'échantillon en fin d'essai permet de mesurer sa porosité accessible au mercure et la courbe dérivée de la courbe de volume cumulé de mercure introduit permet de mettre en évidence les familles de pores présents.

Microscope électronique à balayage (MEB). Les observations en microscopie électronique à balayage (MEB) ont été réalisées avec un Quanta 400 de chez FEI en mode « bas vide » avec présence de 2% max d'humidité relative dans la chambre d'analyse. La surface d'une fracture fraîche de l'échantillon de béton de chaux est observée directement sans métallisation.

Test de résistance en compression (R_c) et mesures de module élastique (E). L'essai de résistance à la compression simple a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques avec $D=9 \text{ cm}$ et $H=18 \text{ cm}$ extraites par sciage à l'eau des carottes de site. Le test est effectué avec une presse 10 t avec un déplacement contrôlé à 0,3 mm/min. Deux anneaux sont fixés sur l'éprouvette à $H/2$ afin d'effectuer les mesures de déplacement au centre de l'éprouvette grâce à des capteurs LVDT installés verticalement et horizontalement lorsque l'éprouvette est chargée (Amrioui et al. 2022).

Évaluation des propriétés mécaniques locales par nano-indentation. Un nanoindenteur de table HIT300 de chez Anton Paar muni d'une pointe Berkovich a permis de mesurer le module d'élasticité (E) sur un échantillon de mortier de chaux « blanc » conformément à la norme NF EN ISO 14577. Pour cela, on a utilisé la courbe de décharge d'un essai de chargement/déchargement de la pointe obtenue avec les paramètres de mesure suivant: effort max = 120 mN, temps de pause = 40s, fréquence = 5 Hz. La surface indentée est plane (Figure 5) et correspond à la surface de sciage à l'eau de l'échantillon (sans polissage). Le déplacement du nanoindenteur se fait de manière automatique selon une ligne depuis le granulats siliceux du béton de chaux bien visible à l'œil nu (granulats roulés quartzeux sur la Figure 5) vers la matrice du mortier de chaux en passant par l'interface mortier/granulats. Les mesures réalisées correspondent à des indents tous les 0,16 mm ce qui a permis de réaliser une statistique sur environ 150 indents.

II. RESULTATS EXPERIMENTAUX

A. Etude de la minéralogie par diffraction de rayons X

Les échantillons de mortier de chaux prélevés à différentes profondeurs dans les couches de différentes couleurs révèlent contre toute attente des compositions assez proches et dominées par le quartz (34 % à 47 %), les feldspaths (albite : 2-7 %, microcline : 2-6 %) mais aussi une quantité significative de calcite (25% à 32%) (Figure 2).

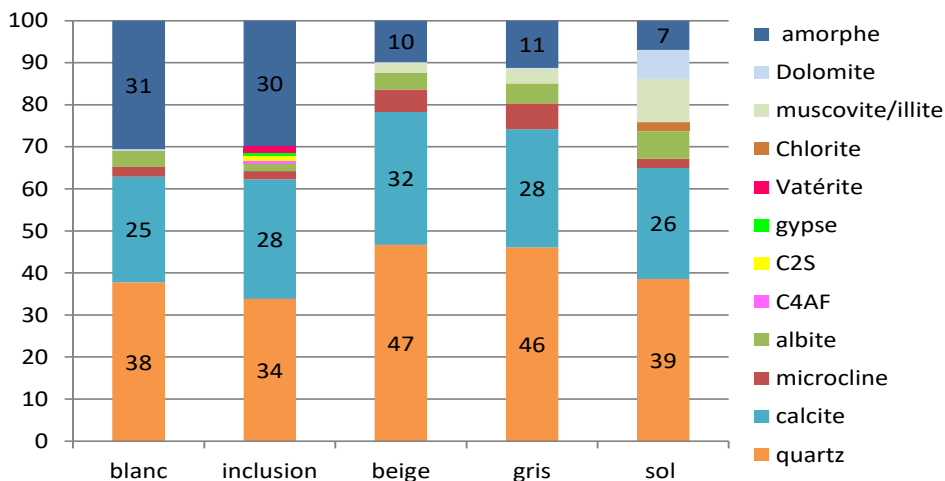


FIGURE 2. Composition minéralogique des échantillons de béton de chaux et du sol encaissant

La calcite peut provenir du sable utilisé dans le mortier (majoritairement quartzueux) mais plus probablement de la carbonatation des phases de la chaux. Dans l'inclusion correspondant à une boulette de chaux mal mixée avec le sable (inclusion rare sur les éprouvettes observées), des traces de phases cimentaires telles que le C4AF (Ferrite $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$) avec des traces de C2S (bellite Ca_2SiO_4) voire de C3S (alite Ca_3SiO_5) ont été détectées ce qui suggère que l'échantillon contient encore une partie de chaux non réagie mais partiellement carbonatée avec la présence de vatérite (polymorphe de la calcite). Cela tendrait à confirmer l'utilisation de chaux hydraulique à base d'argile et de calcaire calcinés au-dessus de 850°C pour cette fondation. Le faible taux d'aluminium de l'ordre de 1.7 à 3.8% dans les échantillons de mortier de chaux analysés par ICP OES après une dissolution totale par attaque acide, renforce l'hypothèse de l'utilisation de la chaux hydraulique contrairement au ciment pouzzolanique potentiellement plus riche en aluminium. Ces derniers utilisent en effet de la chaux vive (CaO) avec une pouzzolane riche en aluminium, à l'instar du béton romain. Du gypse, utilisé généralement comme régulateur de prise hydraulique, a également été observé sous forme de trace dans l'inclusion de chaux mal mixée.

La minéralogie du sol encaissant est somme toute assez proche de celle des mortiers de chaux mais son aspect visuel est très différent avec une couleur verdâtre, une texture à grain fin et l'absence de granulats ou sable grossier. Il contient des argiles de type illite/muscovite (argiles que l'on peut considérer comme des marqueurs de la présence de sol dans les bétons de chaux). Des zones de mélange de sol et de chaux sont en effet possibles localement comme le montre la minéralogie du mortier gris prélevé dans la couche superficielle au-dessus de la couche de roche du Gard ou l'échantillon de mortier de chaux beige positionné juste en dessous de la roche du Gard. La couleur grise du béton de chaux de surface pourrait provenir de cette incorporation

d'argile lors de la mise en œuvre du béton. Elle pourrait se traduire par une potentielle réduction de la durabilité du mélange béton de chaux/sol. On observe aussi dans le sol du site une argile de type chlorite avec de la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ que l'on ne retrouve pas dans les bétons de chaux

Aucune trace de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, habituellement présente dans la chaux hydratée, n'a été observée. La portlandite semble avoir disparu au profit des carbonates de calcium (principalement de la calcite). Cela indique une carbonatation importante (excepté dans les inclusions) du massif de béton de chaux qui a des dimensions pluri-métriques. Or la carbonatation sous eau est généralement considérée comme très lente voire négligeable compte tenu de la faible diffusion du CO_2 dans l'eau. On ne peut écarter l'hypothèse que ces carbonates proviennent d'une chaux hydraulique initialement mal calcinée avec la présence résiduelle de calcaire, étant donné la présence de fours à chaux locaux dans bon nombre de villages du Sud-Est de la France au 19^{ème} siècle. La présence de C4AF dans l'inclusion de chaux non mixée analysée semble réfuter cette hypothèse. Enfin, les carbonates peuvent aussi être hérités du mode de mise en œuvre du béton de chaux, couches par couches avec un contact plus ou moins prolongé avec l'air (selon la durée du chantier) avant immersion dans l'eau de la rivière. Une étude historique permettrait d'obtenir plus de renseignements sur la provenance et les processus de fabrication de la chaux en 1850 et devrait aider à trancher concernant l'origine des carbonates.

Concernant les amorphes associés à des hydrates cimentaires comme les CSH (rencontrés dans les mortiers de chaux hydrauliques) ou à la silice issue du sable à mortier utilisé, leur quantité varie entre 11 % et 31 % (Figure 2) avec une faible teneur dans le sol encaissant soit 7%. Les quantités d'amorphe sont les plus importantes dans les échantillons de béton blanc (équivalent à ceux mesurés dans l'inclusion de chaux) alors que la calcite a une teneur assez similaire dans tous les échantillons y compris dans le sol, quelle que soit la position en profondeur du prélèvement. En d'autres termes, aucun gradient de carbonatation ne semble présent dans les échantillons alors que le phénomène de carbonatation progresse lentement depuis les surfaces externes vers le cœur des massifs cimentaires..

B. Observations MEB des bétons de chaux du site

Les échantillons de mortier de chaux observés au MEB montrent sur la Figure 3 des profils assez similaires avec la présence de gros grains de quartz correspondant au sable du mortier et dont les surfaces lisses avec des bords arrondis caractérisent un sable roulé alluvionnaire. La matrice entre les grains qui correspond à la chaux hydratée, contient des zones avec des feuillet/filaments assez typiques des hydrates cimentaires (avec par exemple des silicates de calcium hydraté CSH ou des aluminates CASH) et des particules micrométriques plus massives réparties de manière uniforme et en quantité plus ou moins importante de couleur blanche sur les images en mode électrons rétrodiffusés. Ces particules sont des grains de carbonate de calcium (calcite ou vaterite) observés dans tous les échantillons sous forme de petits amas à proximité des hydrates. Cette observation suggère une possible nucléation en place des carbonates renforçant l'idée de carbonatation du mortier de chaux. Une structure sous forme de « gel » caractéristique des hydrates cimentaires amorphe est également bien visible avec des feuillet d'hydrates dont la taille est autour de 1-10 μm (Figure 3b). Aucune particule de grande taille avec des formes de plaquettes hexagonales qui

sont associées à la portlandite, n'est observée parmi les échantillons observés (en accord avec la DRX) excepté dans une zone très locale.

Enfin, il est difficile de mettre en évidence des profils d'altération ou des différences nettes entre les échantillons de béton de chaux de différentes couleurs et prélevés à des profondeurs variables et sur les fondations de différentes piles du pont étudié. La porosité $< 1\mu\text{m}$ (comme observée en porosimétrie par intrusion de mercure sur la Figure 4) semble assez homogène à l'échelle de l'observation faite au MEB. Seul un échantillon de béton de chaux beige sur la Figure 3d montre un aspect poreux avec des sortes de « galeries » micrométrique. Leur origine reste incertaine car elles peuvent être issues de l'altération comme héritées de la mise en place du matériau.

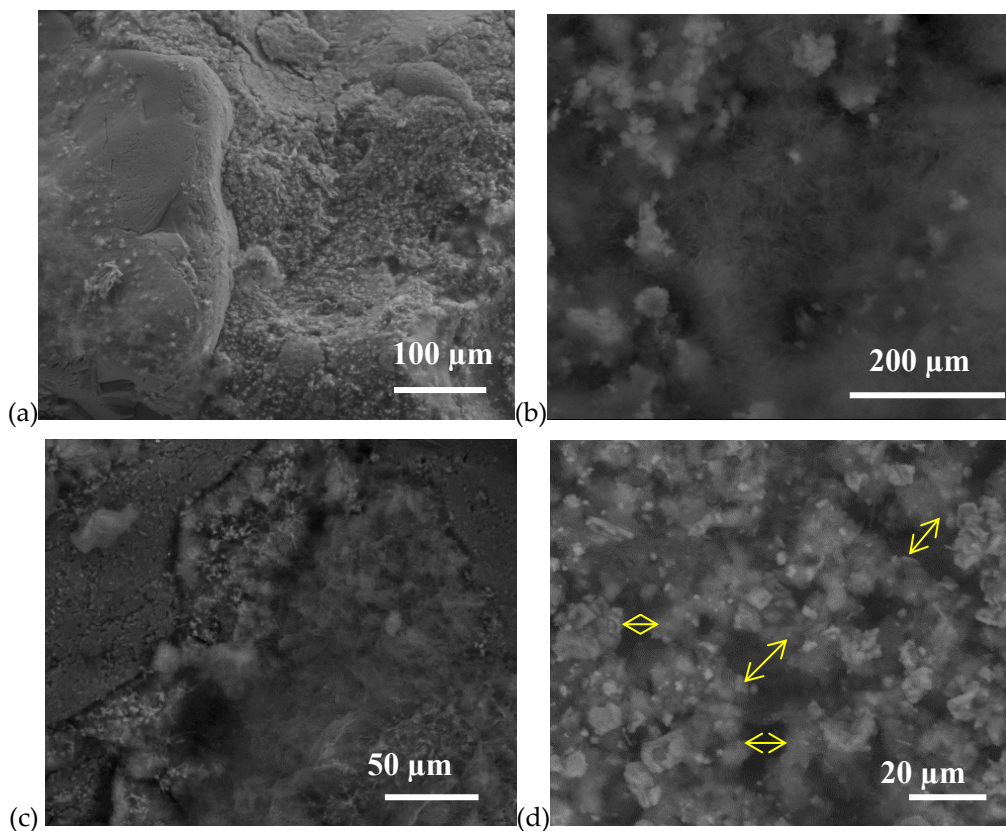


FIGURE 3. Images MEB de mortier de chaux en mode électrons secondaires : (a) béton beige, et en mode électrons rétrodiffusés : (b), (c) béton blanc et (d) béton beige. Observation de petites particules de carbonate réparties de manière homogène avec un aspect piqué des surfaces sur l'image (a). Ces carbonates apparaissent blancs sur les images (b, c et d) à proximité de particules sous forme de feuillets ou de filaments correspondant aux hydrates cimentaires. La zone sur la photo (d) est potentiellement altérée avec une porosité visible de l'ordre de $10\mu\text{m}$

C. Analyses microstructurales PIM des bétons de chaux du site

La porosité des mortiers de chaux testés (correspondant essentiellement au béton blanc) varie d'une valeur minimale de 24,8%, avec des valeurs intermédiaires de 37-35-38% jusqu'à des valeurs importante de l'ordre de 41-45-47-48 % (Figure 4). Les mortiers de chaux présentent tous majoritairement des mésopores ($> 50\text{ nm}$) entre 91 et 171 nm. Un des échantillons collectés dans

une zone potentiellement altérée (zone de cassure/altération) correspondant à la photo MEB de la Figure 3d et noté Poro 1 sur la Figure 4, présente bel et bien des pores de plus grande taille autour du micron mais en revanche le matériau est très peu poreux en comparaison des autres mortiers. Par ailleurs, l'impact de la carbonatation n'est pas explicite sur les courbes de porosimétrie par intrusion de mercure : leur précipitation dans de large pore peut réduire la taille des pores mais elle peut aussi entraîner l'apparition d'une famille de nano-meso-pores créés entre les particules néoformées ou pas déformation de la matrice qui les contiennent. Enfin, pour comparaison, un échantillon de sol verdâtre encaissant révèle une porosité totale bien plus faible de l'ordre de 16,5 % ce qui limite la pénétration des fluides pouvant conduire à de la dégradation. Le sol est donc peu poreux par rapport au béton de chaux et il possède une distribution de pores monomodale étendue jusqu'aux macropores (pores de 100 nm et 10 μm avec une population autour de 0,9 μm).

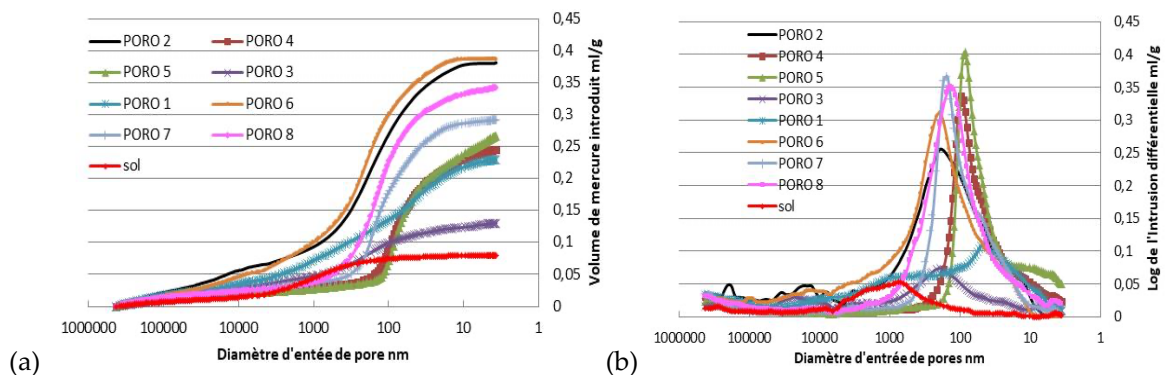


FIGURE 4. Résultats de porosimétrie par intrusion de mercure sur des échantillons de mortier de béton blanc de chaux (excepté Poro 2 sur béton gris) et du sol de site (a) Courbe cumulée de mercure introduit en fonction de la taille des pores. (b) Courbe de distribution des tailles d'accès aux pores

D. Mesure des propriétés du mortier de chaux via la nanoindentation

Une centaine de points d'indentation ont été appliqués à un échantillon de béton de chaux beige. Seuls 83 points ont donné des courbes de chargement/déchargement exploitables ce qui est assez satisfaisant compte tenu de l'absence de poli miroir de la surface de l'échantillon avant essai. La Figure 5 donne le module d'élasticité E mesuré en fonction du numéro de l'indent, suivant l'ordre chronologique des mesures réalisées sur une ligne tous les 160 μm . Les valeurs du module varient entre 30 et 40 GPa en moyenne sur la zone correspondant au granulat (quartz). A partir de l'indent n°37, des pics avec des valeurs très importantes correspondant à l'interface en creux (trous) entre le granulat quartzueux et le mortier de chaux. A partir du n°45, les mesures concernent le mortier de chaux qui contient des carbonates, des CSH et d'autres phases minéralogiques cristallines ou amorphes associées à la pâte du mortier ainsi que le quartz avec de la microcline et l'albite constituant les grains de sable. Les valeurs de nanoindentation montrent une variabilité des propriétés mécaniques à l'échelle locale compte tenu de la composition minéralogique complexe du mortier. Il est difficile de dire quels points correspondent à des CSH étant donné que l'on n'observe pas la zone précisément indentée. On travaille donc à partir de moyenne et de statistique. Les valeurs les plus faibles, autour de 5 GPa pourraient être associées aux hydrates cimentaires dans un état lixivié si on se reporte aux résultats de Constantinides et Ulm (2004). Notez que cette valeur de module est du même ordre de grandeur que la valeur de E

mesurée lors de l'essai de compression sur un échantillon macroscopique prélevé sur la même carotte à proximité, soit 1,1 GPa (Tableau 1).

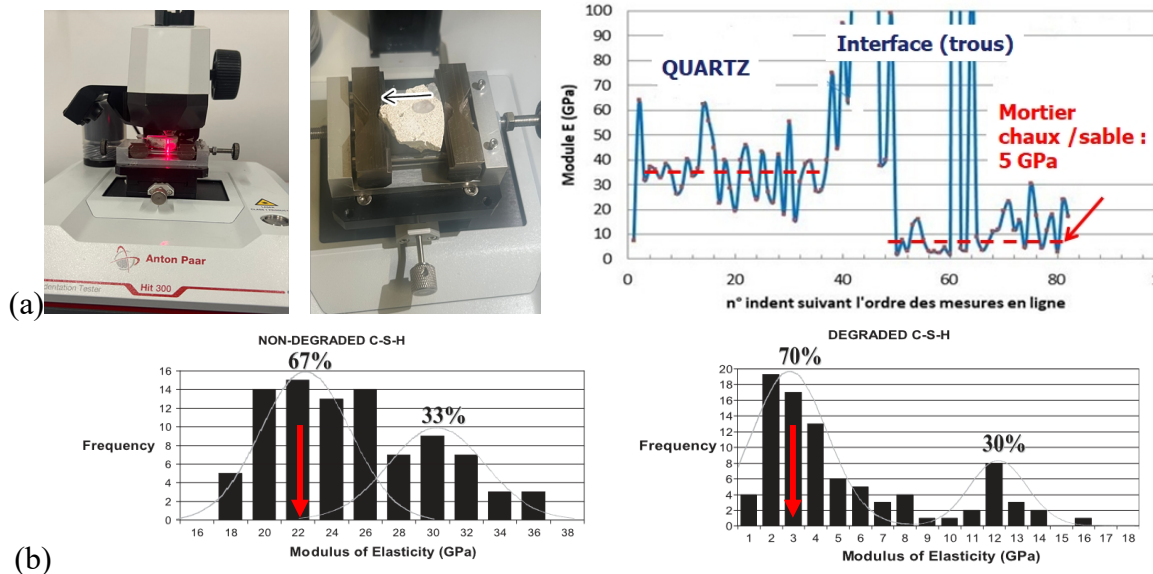


FIGURE 5. (a) Photo du nanoindenteur, échantillon de béton de chaux indenté selon une ligne dans le sens spécifié par la flèche depuis le granulat quartzueux vers le mortier de chaux, courbe de module d'élasticité E en fonction du numéro d'indentation en suivant l'ordre des mesures sur la ligne de mesure, **(b)** Résultat de nanoindentation sur une matrice cimentaire saine (à gauche) et altérée (à droite) par lessivage – matrice à base de clinker (Constantinides et Ulm, 2004).

E. Résistance mécanique en compression sur le béton de chaux

Les valeurs de résistance en compression R_c des bétons de chaux testés dans le Tableau 1 sont comprises entre 3,8 et 7,7 MPa, soit l'ordre de grandeur des valeurs obtenues également par le bureau d'étude en charge des caractérisations avant travaux de réparation par injection. Ces résultats se situent dans la plage des valeurs observées dans la littérature pour les bétons de chaux, soit des valeurs entre 2 et 5 MPa, en fonction des conditions de cure, de la composition et du degré de carbonatation (Salman et al., 2017 ; Lanas et al. 2004). Les valeurs de module d'élasticité E comprises entre 1,1 à 11,6 GPa observées dans le Tableau 1 peuvent là encore par leur variabilité, indiquer des zones plus ou moins dégradées à l'échelle macroscopique.

TABLEAU 1. Résistance en compression. *Mesures en bureau d'étude géotechnique, ** échantillon soumis à l'essai d'indentation

Echantillon	Densité (g/cm ³)	R _c (MPa)	Module E (GPa)
Blanc		3,7*	--
Blanc	2,23	7,7	11,6
Beige		5,2*	--
Blanc	2,14	5,25	1,1
Blanc		5,2*	--
Beige		6,9*	--
Beige	2,06	4,3	3,2
Beige**	2,16	3,8	1,1
Blanc		5,2*	--
Blanc		4,9*	--

IV. CONCLUSIONS

La caractérisation d'un béton de chaux ancien constitutif d'une fondation immergée depuis 1850 a montré la présence de carbonates de l'ordre de 25% avec des hydrates cimentaires qui pourraient être dans un état lessivé. La nature de la chaux utilisée et l'origine des carbonates présents au cœur de la fondation de plusieurs mètres d'épaisseur restent difficiles à identifier alors que la dégradation enregistrée se manifeste non pas à l'échelle micro avec la formation de macropores mais par la présence de zones poreuses ou de vides atteignant plusieurs décimètres d'épaisseur où la chaux a quasiment disparu avec seulement la présence du granulats non soluble. Cette dissolution de surface (dans une fissure évoluant en cavité) s'apparente au processus karstiques.

REFERENCES

- AFTES (2006) Recommandations de l'AFTES. La conception et la réalisation des travaux d'injection des sols et des roches – GT8R2F1. *Tunnels et Ouvrages Souterrains* – N° 194-195.
- Apostolopoulou M., Bakolas A. & Kotsainas M. (2021) Mechanical and physical performance of natural hydraulic lime mortars, *Construction and Building Materials*, 290,123272.
- Borges C., A. Santos Silva & R. Veiga, (2014) Durability of ancient lime mortars in humid environment, *Construction and Building Materials*, 66, 606-620. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.019
- Brandon C., Hohlfelder R.L., Oleson J.P. & Stern C. (2005). The Roman Maritime Concrete Study (ROMACONS): the harbour of Chersonisos in Crete and its Italian connection, *Environnements littoraux méditerranéens, héritages et mobilité*, 104, 25-29.
- Constantinides G. & Ulm F.J. (2004). The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling, *Cement and Concrete Research*, 34 (1), 67-80. <https://hal.science/hal-03680253/document>
- Cuevas K., Wendland D., Winnefeld F. & Stephan D. (2023). Chemical, Mineralogical and Mechanical Characterization of Ancient Roman Concrete and Mortar: A Review. *International Journal of Architectural Heritage*, 19(1), 1-25. doi.org/10.1080/15583058.2023.2256259
- Elert K., Carlos R., Eduardo P., Eric H. & Olga C. (2013). Lime Mortars for the Conservation of Historic Buildings. *Studies in Conservation*, 47, 21p. doi.org/10.1179/sic.2002.47.1.62
- Guide (1980). Fondations de ponts en site aquatique en état précaire: Guide pour la surveillance et le confortement. Hors collection. Cerema. Bron, 167p.
- Lanas J., Pérez Bernal J.L., Bello M.A. & Alvarez Galindo J.I. (2004) Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars, *Cement and Concrete Research*, 34, 12, 2191-2201,
- Salman M. M., & Muttar A. A. (2017). The mechanical properties of Lime Concrete. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 21(2), 180-191.
- Amrioui, J., Duc, M., Le Kouby, A., Guédon, J. S. (2022). Impact des inclusions de sol dans la matrice Deep soil mixing. *Actes des JNGG 2022*, <https://hal.science/hal-03719836v1>.