

ÉGYPTE : VERS UNE RESTAURATION DURABLE ET LOCALE, PRODUCTION ET DIFFUSION DE L'EMPLOI DE LA CHAUX POUR LE RAGRÉAGE DU GRÈS AU TEMPLE DE PTAH À KARNAK

LUCIE PIERI

Résumé Les temples de Karnak, dont fait partie le temple de Ptah, ont fait l'objet de multiples campagnes de restauration depuis leur excavation à la fin du XIX^e siècle. L'utilisation de ciment noir en mortier pour le ragréage des parties lacunaires et en injection dans les joints accentue fortement les altérations liées à la cristallisation des sels dans le grès (désagrégation granulaire). La chaux aérienne locale est de qualité médiocre, c'est pourquoi une part plus ou moins importante de ciment est presque toujours ajoutée dans les mortiers.

Des recherches empiriques ont permis de formuler un mortier de ragréage à la chaux répondant à la fois aux contraintes de conservation, de mise en œuvre dans un climat désertique et d'approvisionnement en matériaux. Un long travail de dialogue a permis de convaincre les dirigeants locaux d'utiliser la chaux et d'organiser une petite production sur site.

Ces travaux ont été menés entre 2011 et 2013, dans le cadre d'un volontariat international du ministère des Affaires étrangères au Centre franco-égyptien d'étude des temples de Karnak (CFEETK – USR 3172 du CNRS / ministère des Antiquités d'Égypte), sous la direction de Christophe Thiers.

Le temple de Ptah : construction et anciennes restaurations

Le temple de Ptah (**fig. 1**) est situé au nord du domaine d'Amon-Rê à Karnak (Louxor). Bien que de petite taille, il est représentatif des altérations et des restaurations anciennes rencontrées à Karnak. Sa construction s'étale sur 1200 ans environ, entre 1400 et 200 avant J.-C., du règne de Thoutmosis III pour le sanctuaire aux dynasties koushites et ptolémaïques pour les portes.

Le grès utilisé pour la construction provient des carrières du Gebel Silsileh près d'Assouan, à une centaine de kilomètres au sud de Louxor. C'est un grès siliceux, cimenté par des oxydes de fer en faible proportion (1-2 %) qui le colorent du jaune au brun. Il est peu résistant, surtout en milieu humide. Sa porosité est élevée : entre 18 et 25 %, voire 28 % selon les sources (Martinet, 1992, p. 51; Traunecker, 1972). C'est donc un matériau très sensible aux phénomènes de cristallisation de sels.

Le temple de Ptah est un bon exemple des travaux entrepris sur la majorité des temples de Karnak : il a été redécouvert à partir du milieu du XIX^e siècle, dégagé en partie par Mariette en 1875 puis entièrement par Georges Legrain en 1896. La trace du niveau d'enfouissement original est bien visible sur les photos de Legrain (**fig. 2**). Cette ancienne zone d'évaporation

est particulièrement concentrée en sels hygroscopiques qui absorbent l'humidité atmosphérique en hiver.



Figure 1 Temple de Ptah, vue générale avant intervention. © CFEETK, J.F. Gout.



Figure 2 Temple de Ptah, avant dégagement par G. Legrain en 1896.
Source : Azim, Réveillac, 2004, p. 311.

Le temple a été restauré à plusieurs reprises. Georges Legrain, directeur des travaux de Karnak de 1895 à 1917, reconstruit la partie supérieure effondrée des murs sud et est avec des blocs de grès de remploi, incluant parfois des fragments épigraphiés (**fig. 3**). Le mortier employé est soit à base de chaux, soit à base d'un mélange de chaux et de ciment, chargé avec de la poudre de brique pilée afin de lui donner des propriétés hydrauliques. Le même type de maçonnerie est utilisé pour le ragréage des parties basses dans le bâtiment principal et la cour. Ces réfections sont généralement bien conservées et ont causé peu de dommages.



Figure 3 Réfection des murs par G. Legrain vers 1900 en grès de remploi.
© CFEETK, L. Pieri.

Par la suite, dans les années 1930, son successeur Henri Chevrier redresse les portes, qui étaient au bord de l'effondrement, en systématisant l'emploi de ciment. Bien que ces interventions aient certainement sauvé les bâtiments à l'époque, les matériaux utilisés sont totalement incompatibles avec le grès. Le mortier de ciment noir et de sable employé et, surtout, un lait de ciment injecté dans les joints et fondations, ont provoqué en quelques dizaines d'années des altérations importantes (**fig. 4**).



Figure 4 Ragréage par H. Chevrier vers 1930 en brique et ciment noir.
© CFEETK, L. Pieri.

Altérations du grès et traitements

Les altérations se concentrent dans trois zones :

- au niveau de l'ancien sol, où sont encore présents les sels apportés par la terre sédimentée avant qu'elle soit dégagée, sels qui peuvent être remobilisés en hiver lorsque l'humidité atmosphérique est haute;
- dans les parties basses, soumises avant 1965 à la crue annuelle du Nil et, depuis la construction du haut barrage d'Assouan en 1965, aux remontées capillaires de la nappe phréatique dont le niveau s'est considérablement élevé;
- sous et à proximité des ragréages anciens réalisés au ciment noir, zones qui sont dans l'état le plus préoccupant aujourd'hui.

Hormis ces zones, les blocs en grès décorés en bas-relief sont dans un très bon état de conservation grâce au climat propice de Haute-Égypte : c'est un climat subdésertique, il ne pleut quasiment jamais et l'humidité atmosphérique est faible, sauf en hiver où elle oscille entre 40 et 60 % avec des pics à 80 % au lever du soleil.

La plupart des altérations sont liées aux remontées capillaires et à la cristallisation des sels. Les fissures, d'origine structurelle ou thermique, forment une interface d'évaporation où cristallisent les sels et s'ouvrent de plus en plus sous leur poussée. Des croûtes de sels parfois millimétriques ont pu être observées derrière certains fragments désolidarisés. Les analyses faites dans les années 1980 et 1990 par Bromblet et Martinet (Bromblet, Bocquier, 1985; Martinet, 1992, p. 59-60) montrent principalement la présence de sulfates (gypse, thénardite) sous la surface et de chlorures (halite) en surface. Par ailleurs, autour des ragréages au ciment on observe de nombreuses fractures et fragments : la rigidité du ciment ne permet pas d'absorber le mouvement du bâti.



Figure 5 Désagrégation du grès sous les ragréages au ciment. © CFEETK, L. Pieri.

Au niveau de l'ancien sol et surtout sous les ragréages au ciment on observe une désagrégation granulaire ou « arénisation ». Cela est dû à la cristallisation des sels dans la pierre à l'interface avec le ciment. Après retrait des ragréages en brique et mortier de ciment, on observe clairement l'altération du grès sous ces comblements imperméables et rigides (**fig. 5**). Ils forment un couvercle empêchant la circulation

de l'eau et la sortie des sels. Lorsque les joints ont été injectés de lait de ciment pur, la désagrégation peut atteindre dix à quinze centimètres de profondeur.

La plupart des altérations ont donc comme cause les remontées capillaires et la cristallisation des sels dans la pierre et sont fortement aggravées en présence de ciment.

Le traitement mis en œuvre sur ce chantier a consisté en une élimination progressive des anciens ragréages et dans la mesure du possible des joints au ciment noir, après étayage de la structure (fig. 6). À l'arrière, la pierre non sculptée, trop désagrégée pour être conservée, a été purgée.

Les reliefs et la surface à ragréer ont ensuite été consolidés au silicate d'éthyle, entre novembre et février, afin de bénéficier des conditions climatiques permettant la réaction du produit.

Les nouveaux ragréages et enduits devaient ensuite être réalisés avec des moellons de grès et un mortier ne provoquant pas de nouvelles altérations.



Figure 6 Porte A, élimination des anciens ragréages et ciment. © CFEETK, L. Pieri.

Formulation et diffusion des mortiers d'enduit à la chaux

L'usage en cours : des mortiers ciment-chaux

De nos jours encore, les mortiers employés sur les chantiers en cours à Karnak font entrer une part non négligeable de ciment blanc associé à la chaux locale dans leur formulation.

Ces mortiers sont formulés en proportion 1 :3, une part de liant pour trois parts de charge. La charge, du sable, constitue le squelette de l'enduit et apporte de la porosité afin de garantir l'apport d'air nécessaire à la prise et la perméabilité de l'enduit par la suite.

En revanche, comme pour les mortiers utilisés au début du siècle, le liant est toujours un mélange de chaux et de ciment : deux parts de ciment pour une part de chaux dans l'enduit de dégrossi (première couche appliquée en épaisseur pour régulariser); une part de ciment pour une part de chaux dans l'enduit de finition.

Caractéristiques recherchées pour le nouveau mortier

Afin de ne pas générer de nouvelles altérations, le nouveau mortier devait répondre aux critères suivants : résistance moindre que la pierre altérée, perméabilité à la vapeur d'eau afin de laisser sortir les sels, souplesse pour s'adapter aux mouvements du bâti. Il doit aussi répondre aux contraintes locales : mise en œuvre en climat désertique, approvisionnement et coût raisonnables, et en outre s'adapter aux habitudes de travail.

Ces caractéristiques ont parfois été difficiles à faire passer auprès des ouvriers et dirigeants qui recherchent rapidité d'exécution et dureté, notamment afin d'éviter les graffiti. Il a donc été nécessaire de dialoguer en pointant les altérations causées par les mortiers inadaptés et en argumentant : il est préférable que les graffiti soient gravés dans les enduits de restauration plutôt que sur la pierre ancienne, comme cela se produit au voisinage d'enduits ciments trop durs. On peut aussi conseiller un entretien régulier mais limité à refaire périodiquement la couche de finition colorée. Mettre en place plus de surveillance limiterait aussi les dégradations, mais les moyens font défaut.

Les liants à disposition

La résistance du grès nubien, aux alentours de 25 MPa lorsqu'il est sain (Martinet, 1992), donne un point de référence pour juger des liants disponibles. Le ciment blanc égyptien présente une résistance d'environ 50 MPa, deux fois plus élevée que celle du grès sain (Martinet, 1992). La chaux aérienne, au contraire, a une résistance moindre que celle du grès, environ 7 MPa¹ et apporte souplesse et perméabilité (École d'Avignon, 2003, p. 45). Les contraintes sont cependant une prise par carbonatation très lente et une résistance définitive atteinte au bout d'un an voire plus. Elle demande en outre un grand soin dans la mise en œuvre par rapport à la facilité relative du ciment.

Une chaux locale de mauvaise qualité

Ce n'est pas sans raison que les responsables successifs ont utilisé une quantité importante de ciment dans les mortiers : la chaux locale est de mauvaise qualité. Chaux aérienne, elle se présente en poudre grossière mêlée de blocs. Obtenue par calcination à faible température de blocs calcaires, sa cuisson est incomplète, d'où la présence de nombreux fragments d'incuits et impuretés. Ces déchets sont éliminés par un tamisage grossier (fig. 7) et représentent une perte de 15 à 20 % de matière première.

L'extinction des blocs de chaux vive est faite par aspersion des blocs grossièrement concasés, ainsi la chaux obtenue n'est que partiellement éteinte et présente encore des nodules de chaux vive qui peuvent provoquer des cratères dans les enduits en s'hydratant. Les conditions de stockage dans des sacs peu hermétiques peuvent aussi engendrer un début de prise.

1. Données pour une chaux aérienne française en poudre.



Figure 7 Tamisage de la chaux locale pour éliminer les incuits.
© CFEETK, L. Pieri.

Finalement, la teneur en oxyde de calcium est faible, ce qui réduit le pouvoir liant. Les mortiers obtenus sont très friables, peu adhérents et pulvérulents.

En outre, il est difficile d'avoir un approvisionnement suivi de chaux car le matériau est complètement tombé en désuétude. L'industrie cimentaire étant très développée en Égypte, le coût de la chaux est quasiment identique à celui du ciment, pour un rendement moindre. La chaux requiert en outre plus de temps pour la mettre en œuvre et une main-d'œuvre qualifiée. Difficile ainsi de convaincre les ouvriers et dirigeants locaux de changer leurs habitudes.

Recherches empiriques

Malgré ces difficultés, nous ne souhaitons plus utiliser de ciment sur les zones fraîchement consolidées et débarrassées des ragréages anciens. Dans un premier temps, de la chaux française importée a été utilisée, solution temporaire peu adaptée d'un point de vue écologique et économique du fait des coûts d'importation élevés.

Une prise de contact avec l'*American research center in Egypt* (ARCE), qui travaille sur un chantier adjacent au temple de Khonsou, nous a apporté une solution viable. Une production de chaux aérienne en pâte sur site y a été mise en place sous la direction du directeur John Sherman et d'Elsa Bourguignon, responsable du laboratoire.

Nous avons testé cette chaux, parallèlement à la chaux locale et à une chaux aérienne française (Saint-Astier). Des carrés de test nous ont permis de vérifier l'adhérence et la friabilité des mortiers obtenus avec ces liants et un ajout de ciment en différentes proportions (**fig. 8**). De simples tests de rayure avec un bâtonnet imitant les graffitis ont été réalisés, un mois, trois mois et six mois après la pose.

La chaux locale en poudre est effectivement très médiocre, utilisée dans les proportions 1 :3 (une part de chaux pour trois parts de sable). La chaux aérienne française en poudre donne des résultats satisfaisants. Mais les meilleurs résultats sont atteints avec la chaux en pâte

Chaux locale poudre	Chaux en pâte ARCE	Chaux aérienne St Astier	Ciment : Chaux : Sable (Parts volumiques)	% de ciment dans le liant	% de ciment sur le total
CIMENT BLANC			1:0:3	100%	25%
			2:1:3	75%	18,75%
			1:1:3	50%	12,5%
			1:2:3	25%	6,25%
CHAUX AERIENNE			0:1:3	0%	0%

Tests de résistance de mortiers à la chaux et au ciment
1 part de liant (chaux et/ou ciment) pour 3 parts de charge (sable)

Figure 8 Tests de résistance de mortiers à la chaux et au ciment. © L. Pieri.

produite sur site : après six mois, la surface est même plus résistante à la rayure qu'un mortier de ciment pur.

Par rapport à la chaux aérienne en poudre, la chaux en pâte offre une onctuosité et une plasticité qui facilitent grandement la mise en œuvre. Sa faible demande en eau ainsi qu'une rétention d'eau importante permettent son utilisation même en cas de forte chaleur. Nous avons constaté que la surface des enduits réalisés était déjà assez résistante dès le début de la prise, le lendemain de la pose. Sa grande finesse permet de réaliser des enduits de finition. Ces résultats encourageants nous ont permis de convaincre le CFFETK de mettre en place une unité de production de chaux en pâte sur le site. Un an a été nécessaire pour entreprendre les tests, les achats, la mise en œuvre et le trempage, avant de pouvoir finalement utiliser cette chaux (**fig. 9**). Le protocole mis en place par l'ARCE a été repris : contrôle qualité de la chaux vive lors de l'achat par des tests simples (*rapid sugar test*), extinction en bac dans une grande quantité d'eau, malaxage et retrait des incuits, trempage de plusieurs mois (3 à 4 mois minimum), tamisage fin avant utilisation.

Amélioration de la chaux locale

En attendant de disposer de cette chaux en pâte de qualité, nous avons parallèlement tenté d'améliorer la chaux locale disponible, sur le modèle *tadelakt* marocain. La chaux marocaine



Figure 9 Fabrication de chaux en pâte sur site, malaxage. © CFEETK, L. Pieri.

artisanale est fabriquée à peu près de la même façon que la chaux égyptienne. Elle est ensuite remise à tremper de quelques jours à quinze jours afin de terminer l’extinction avant de l’utiliser. Elle est enfin mélangée avec une faible proportion de sable, voire pas de sable du tout, car elle contient intrinsèquement une part de charge du fait des impuretés et incuits restants (École d’Avignon, 2003).

De la même façon, la chaux locale a été trempée à nouveau puis utilisée en proportions 1 :2 et non 1 :3, en considérant qu’impuretés et incuits constituent une charge intrinsèque. On obtient ainsi un mortier grossier mais assez résistant, parfaitement adapté pour les enduits de dégrossi.

Conclusion

Il a été possible d’arrêter l’emploi de ciment au CFEETK et de mettre au point une nouvelle méthodologie de ragréage, avec des mortiers à base de chaux locale. Deux ans se sont écoulés entre les premiers tests et l’achèvement des travaux sur le temple de Ptah (**fig. 10**). S’agissant d’un chantier commencé plusieurs années auparavant, seulement une partie des enduits a pu être réalisée à la chaux. Retrempée en proportions 1:2, la chaux locale a été employée pour les enduits de dégrossi. La chaux en pâte très fine produite *in situ* est idéale en enduit de finition. Les ouvriers sont convaincus, les dirigeants égyptiens le sont en partie. Des résistances subsistent en raison du travail de préparation du matériau supplémentaire et des habitudes de travail avec le ciment. Les chantiers en cours au CFEETK continuent d’utiliser la méthodologie mise en place, avec un roulement de production de chaux continu.



Figure 10 Porte A après réalisation des enduits de finition. © CFEETK, L. Pieri.

Références bibliographiques

Azim M., Réveillac G. (2004), *Karnak dans l'objectif de Georges Legrain. Catalogue raisonné des archives photographiques du premier directeur des travaux de Karnak de 1895 à 1917*, Paris.

Bromblet P., Bocquier G. (1985), *Données pétrologiques concernant l'altération des grès des temples de Karnak (Égypte)*, rapport, CFEETK.

École d'Avignon (2003), *Techniques et pratique de la chaux*, Paris, Eyrolles, p. 118-119.

Martinet G. (1992), *Grès et mortiers du temple d'Amon à Karnak (Haute-Égypte) : étude des altérations, aide à la restauration*, Paris, Laboratoire central des ponts et chaussées, p. 51, 59-60, 104.

Larché F., Lefur D., *La restauration de la cour de Thoutmosis IV*, article non publié, communiqué par l'auteur.

Lefur D. (1994), *La conservation des peintures murales des temples de Karnak*, Paris, ERC.

Traunecker C. (1972), « Aperçu sur les dégradations des grès dans les temples de Karnak », *Cahiers de Karnak*, n° 5, p. 119-130.

L'auteur

Lucie Pieri conservatrice-restauratrice de sculptures,
lucie.pieri@gmail.com.