MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ANNALES ISLAMOLOGIQUES

en ligne en ligne en ligne en ligne en ligne en ligne en ligne en ligne en ligne en ligne

AnIsl 41 (2007), p. 209-228

Christophe Bouleau

Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l’émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor

Conditions d’utilisation

L’utilisation du contenu de ce site est limitée à un usage personnel et non commercial. Toute autre utilisation du site et de son contenu est soumise à une autorisation préalable de l’éditeur (contact AT ifao.egnet.net). Le copyright est conservé par l’éditeur (Ifao).

Conditions of Use

You may use content in this website only for your personal, noncommercial use. Any further use of this website and its content is forbidden, unless you have obtained prior permission from the publisher (contact AT ifao.egnet.net). The copyright is retained by the publisher (Ifao).

Dernières publications

9782724711264	*La chapelle d’Osiris Ounnefer Neb-djefaou*	Laurent Coulon
9782724711752	*Guide du Caire Islamique*	Hadrien Collet
9782724711660	*Mélanges de l'Institut dominicain d'études orientales 41*	Adrien Candiard (éd.)
9782724711745	*Bulletin archéologique des Écoles françaises à l'étranger (BAEFE)*	
9782724711271	*Du côté de chez Zeus*	Emmanuel Botte (éd.), Hélène Cuvigny (éd.), Michel Reddé (éd.)
9782724711677	*La Description de l’Égypte*	Paul-Marie Grinevald
9782724711714	*La pensée et la pratique pharmacologiques d’Avicenne*	Sylvie Ayari
9782724711899	*BCAI 40*	

© Institut français d’archéologie orientale - Le Caire

CHRISTOPHE BOULEAU

Bâtir une coupole en pierre de taille

La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor

Bâtir une coupole en pierre de taille à double parement, ornée d'un motif géométrique sculpté sur l'extrados exige de la part du maître d'œuvre discipline et coordination. À la lumière de nombreuses observations sur le bâti monumental mamlouk, il semble que les coupoles soient les éléments d'architecture ayant fait appel aux maîtres d'œuvre les plus qualifiés afin de réaliser des ouvrages où décor et structure s'intègrent parfaitement.

En Égypte, la coupole est à partir du XIII^e^ siècle l'expression extérieure de la présence d'un mausolée. À cette époque se généralise en effet une pratique de construction de monuments funéraires de grande dimension par les sultans et princes mamlouks qui font bâtir, de leur vivant et à grands frais, une *qubba* pour abriter leur sépulture. C'est autour d'un ou de plusieurs mausolées qu'ils instituent généralement un *waqf*, une fondation pieuse et charitable régie à perpétuité, qui comprend une mosquée, une *madrasa*, un *sabīl* et parfois un *rabʿ*. Ces ensembles démontrent la puissance et l'opulence de leur fondateur ici-bas et assurent la pérennité de sa mémoire.

Les coupoles de pierre des mausolées s'élevant ainsi à plusieurs dizaines de mètres au-dessus du niveau de la rue jouent tout autant un rôle de manifestation du pouvoir que de perpétuation de la mémoire, faisant de l'espace urbain un espace de représentation. À l'échelle de la ville, les coupoles forment, avec les minarets, de remarquables signes urbains jalonnant les artères principales du Caire médiéval et elles ponctuent les perspectives de leur calotte surmontée du croissant de l'islam.

S'agissant d'un des traits distinctifs de l'architecture mamlouke au Caire, les coupoles ont été abondamment dessinées et photographiées depuis un siècle et demi[1]. À la fin du XIX^e^ siècle,

1. Emmanuel Prisse d'Avennes, Pascal Coste, David Roberts et d'autres se sont intéressés à représenter la variété des coupoles de mausolées mamlouks.

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

Auguste Choisy leur consacre quelques lignes dans sa monumentale histoire de l'architecture [2], situant l'origine des coupoles en pierre du Caire à la Perse seldjoukide. Il a pourtant fallu attendre la fin du XX^e siècle pour qu'une étude se consacre spécifiquement à la question des coupoles en pierre de taille au Caire. L'émergence, l'évolution formelle et la typologie des coupoles en pierre de taille dans l'architecture mamlouke au Caire ont été remarquablement mises en lumière par Christel Kessler qui a ouvert la voie à de nouvelles investigations [3]. Soumettant l'ensemble des coupoles en pierre construites entre le début du XIV^e siècle et le début du XVI^e siècle aux critères de l'analyse formelle, de la nature des matériaux et de la maîtrise du savoir-faire, elle a identifié les caractéristiques de l'émergence, de l'évolution et du déclin de cette pratique de couvrement spécifique à l'architecture funéraire de la capitale des Mamlouks.

Le propos de la présente étude est de suivre la voie ébauchée par Christel Kessler et de mener une analyse architecturale et technique d'une coupole en pierre de taille, la coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek, construite entre 1502 et 1520. Notre attention à ce monument spécifique a été éveillée par notre participation à une campagne de travaux de restauration de plusieurs monuments mamlouks et ottomans dans le quartier de Darb al-Aḥmar [4]. L'opportunité d'accéder grâce à un échafaudage vertical intérieur et extérieur à toutes les parties de l'édifice, d'y effectuer des mesures et relevés, de prendre connaissance des matériaux originaux et de leurs dégradations a permis d'affiner les hypothèses de structure et de construction par des investigations à l'intérieur des maçonneries.

La démarche de la présente étude architecturale est donc d'interroger l'édifice lui-même et de le confronter à une série de questions portant d'une part sur le dessin et la conception d'une coupole et d'autre part sur les procédés de mise en œuvre et les techniques de construction et de décor.

Description de l'édifice

Architecture

Le mausolée de l'émir Khayr Bek fait partie d'un ensemble de constructions édifiées à différentes époques que l'on a pris l'habitude de nommer complexe de Khayr Bek. Les bâtiments attribués à Khayr Bek, érigés durant une période de 1502 à 1520 consistent en une salle de prière voûtée et un mausolée, lié par un escalier et une passerelle couverte à la grande salle du palais Alin Aq, que Khayr Bek avait réutilisée en en faisant sa résidence.

Le mausolée lui-même se compose d'un volume cubique de 7,80 mètres de côté, surmonté d'une zone de transition ornée de *muqarnas* (stalactites), d'un tambour circulaire de 7,45 mètres de diamètre et couvert par une coupole en calotte. C'est une construction dont le plan, parfaitement orienté vers la *qibla*, absorbe la différence d'alignement à la rue de 45 degrés par d'habiles ouvertures en sifflet qui permettent de maintenir l'ordonnancement régulier des élévations

2. Choisy, *Histoire de l'architecture*, p. 101-106.
3. Kessler, *The Carved Masonry Domes*.
4. Ces travaux de restauration, placés sous la direction de l'auteur, ont été entrepris et financés par la fondation Aga Khan Trust for Culture en partenariat avec le Conseil suprême des antiquités égyptiennes à partir de 2001.

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

intérieures et extérieures. Un soubassement de 2,80 mètres de hauteur, surélevé par rapport au niveau de la rue, enferme deux caveaux funéraires voûtés de plan rectangulaire, orientés vers la *qibla* et accessibles sous le pavement du mausolée. Les élévations extérieures se développent sur une douzaine de mètres de hauteur au-dessus de la rue et sont bâties d'une alternance d'assises de pierres calcaires blanches et orangées (fig. 5). C'est au niveau de la zone de transition et de la base des pyramidions extérieurs que ce plan géométriquement complexe se transforme en plan carré. Cette zone permet de même le passage de la géométrie du carré à celle de l'octogone par l'usage des *muqarnas* à l'intérieur et celui des pyramidions à l'extérieur. À ce niveau aussi, la composition bicolore des élévations laisse place à une construction utilisant la pierre calcaire blanche seule. Immédiatement au-dessus de la zone de transition, le plan octogonal forme une terrasse, au-dessus de laquelle se trouve le tambour circulaire de la coupole, percé de 16 baies en arc de plein cintre. Le tambour se développe verticalement sur 12 assises de pierre de taille de couleur blanche (à l'exception de l'entourage orangé du bandeau d'inscription), niveau à partir duquel le diamètre des assises diminue, marquant le commencement de la coupole *stricto sensu* (fig. 6).

La forme géométrique de la coupole du mausolée de Khayr Bek est similaire aux autres coupoles contemporaines formées d'un tambour cylindrique de plusieurs mètres de hauteur, d'un segment de coupole courbe puis d'un couronnement tronconique soutenant un croissant en cuivre, fixé autour d'une tige verticale en bois d'une quinzaine de centimètres de diamètre encastrée dans la maçonnerie du cône sommital. La base inférieure de cet élément en bois est visible de l'extrados de la coupole et sert de support à un anneau de fer ayant jadis soutenu un luminaire. L'ensemble de la construction de cette coupole paraît conçu d'un même jet ; aucune reprise de pierre de taille n'est visible. L'examen de la relation entre la tige de bois et la maçonnerie de pierres qui la soutiennent à l'intrados confirmerait que celle-ci fait partie de la construction originelle. L'authenticité du croissant en cuivre est pour sa part beaucoup plus sujette à caution car celui-ci a fait l'objet de nombreuses réparations (fig. 7).

Dessin et projet architectural

Les sources archivistiques sont muettes quant à d'éventuels dessins ou croquis préparatoires, ce qui n'a rien de surprenant étant donné qu'aucun dessin de projet ou d'exécution n'est connu pour des monuments de l'époque mamlouke. À l'opposé de l'art de bâtir médiéval en Europe dont de nombreux tracés et méthodes de construction sont consignés dans des albums tels celui de Villard de Honnecourt[5] et sous forme de graffitis dans les monuments eux-mêmes, l'archéologie n'a révélé dans les monuments mamlouks du Caire aucun témoignage de tracé géométrique, au sol ou en élévation, qui ait pu permettre de mettre en forme une volonté constructive. On en est réduit à émettre l'hypothèse que la communication d'une intention par le commanditaire se faisait par mode verbal et que la mise en chantier était tout entière gérée par les corps de métiers, au sein desquels le groupe des maîtres maçons et tailleurs de pierre occupaient la fonction centrale de dessin, de définition de la forme et de la structure et de coordination de l'exécution.

5. Hahnloser, « Villard de Honnecourt ».

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

Structure

Les coupoles médiévales que l'on peut observer aujourd'hui dans le panorama urbain du Caire ne représentent pas – loin s'en faut – la totalité des constructions d'une époque. De même que pour tout le patrimoine bâti, le temps a opéré son œuvre sélective sur les coupoles par des événements naturels exceptionnels tels les séismes de grande magnitude associés à des menaces de nature politique, sociale ou économique. Les coupoles en pierre de taille conservées aujourd'hui ont donc survécu à souvent plus de cinq ou six siècles d'histoire urbaine mouvementée. Exposées comme peuvent l'être les ouvrages de couvrement en grande hauteur, elles ont su contenir les secousses sismiques, la poussée inexorable des vents et la pluie, qui bien que rare au Caire, est une cause de nombreuses pathologies du bâti.

La coupole du mausolée de Khayr Bek est bâtie d'assises annulaires constituées de 32, 16, puis de 8 pierres de taille à double parement dont le diamètre réduit au fur et à mesure que l'on s'élève et dont la mise en œuvre clavée obéit à un dessin tout à fait spécifique. L'inclinaison des joints horizontaux vers l'intérieur garantit la stabilité de la structure en permettant à la ligne de descente des charges de suivre la courbe de la coupole et de se maintenir en son épaisseur. Mais ce qui fait la spécificité de ce clavage et de l'inclinaison des joints horizontaux réside dans la combinaison de deux systèmes structurels : la coupole en tas de charge dans la partie basse et la coupole clavée dans la partie de couronnement. Les assises 1 à 16 sont à joints horizontaux tandis que les assises 17 à 21 ont des joints faiblement inclinés et l'on peut considérer comme un clavage la partie de couronnement des assises 22 à 35. Le cône sommital utilise à nouveau dans son extrados le système du tas de charge en recourant à un empilement d'assises parfaitement horizontales. L'irrégularité de l'inclinaison des joints d'assise correspond à la combinaison des différents tracés géométriques de cette coupole, formés d'arcs et de segments droits.

Matériaux

La coupole du mausolée de Khayr Bek, tout comme le mausolée lui-même et la grande majorité des édifices contemporains, est une construction de pierre de taille bicolore, dont les assises sont jointoyées à joints fins dans un souci d'obtenir un parement lisse et uni. Deux pierres calcaires différentes constituent la structure et le parement de l'édifice : l'une de couleur blanche, légèrement fossilifère, et l'autre de couleur orangée, plus compacte et de grain fin. Ces deux pierres proviennent des proches carrières du Muqaṭṭam et du Ǧabal Aḥmar[6]. À partir de la base du tambour, la coupole est bâtie exclusivement de pierres à double parement de 39 centimètres d'épaisseur moyenne, tandis que la hauteur d'assise courante est de 33 centimètres et la longueur des pierres varie selon leur position dans la coupole. De nombreuses pierres, notamment dans les assises du tambour et de la partie inférieure de la coupole, ont une masse de 180 à 200 kilos, ce qui implique pour le chantier des moyens de levage fiables et pourvus de démultiplications.

6. Des analyses mécaniques d'échantillons de pierre ont révélé pour la pierre calcaire blanche une densité moyenne de 2,5 et une résistance à la compression comprise entre 190 kg/cm² et 230 kg/cm².

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

Le mortier de pose et de jointoiement utilisé dans la coupole du mausolée de Khayr Bek est un mortier à base de plâtre contenant une faible quantité de sable fin. Les joints horizontaux et verticaux mesurent en moyenne 1 centimètre de largeur et sont lissés dans le plan du parement. Une observation scrupuleuse des parements extérieurs de pierre de taille révèle des vestiges de plusieurs couches de badigeons de chaux blancs et rouges appliqués directement sur l'épiderme de la pierre, dont l'existence est corroborée par les documents photographiques de la fin du XIX^e^ siècle. Il est documenté qu'à la veille des cérémonies d'ouverture du canal de Suez en 1869, le khédive Ismāʿīl ordonna dans un souci d'embellissement le badigeonnage en bandes de couleur blanches et rouges des monuments du Caire (fig. 4).

La présence de bois et de métal dans la coupole du mausolée est discrète mais indispensable à sa construction. Les seuls éléments de bois que l'on observe dans la structure de la coupole sont les cales de pose des pierres. Celles-ci sont constituées d'un bois de conifère proche du pin et ont les dimensions moyennes de 3 centimètres de largeur, 1 centimètre de hauteur et 4 à 5 centimètres de profondeur. Elles sont disposées, de manière quasi systématique dans l'ensemble de l'ouvrage, sous forme de deux sous chaque pierre à quelques centimètres des deux angles inférieurs. Leur fonction était de permettre, pendant la construction d'une assise de pierres, le réglage horizontal et après la pose du mortier de jointoiement, de soutenir la charge verticale de la pierre en attendant que le mortier effectue sa prise.

Pour sa part, la présence de métal n'est pas perceptible en surface de la structure. Au cours des travaux de restauration, des observations attentives ont révélé que sur plusieurs assises, toutes les pierres étaient fissurées à leurs deux extrémités de manière similaire. Il s'est avéré nécessaire d'effectuer la dépose de bon nombre des fragments de pierre désolidarisés par fissuration et c'est grâce à cette dépose qu'ont été mises au jour des agrafes en fer liant les pierres deux à deux (fig. 16, 17, 18 et le dessin de détail en fig. 19). Leur mode de fixation est toujours le même : l'agrafe est logée dans une engravure, non perpendiculaire à la surface de la pierre mais correspondant exactement à son épaisseur et les deux pattes sont scellées au mortier de plâtre dans leur loge. Sous l'effet de la corrosion, ces agrafes en fer ont augmenté de volume et provoqué l'éclatement du parement de pierre extérieur.

Hypothèses et éléments d'interprétation

Structure et matériaux

Le recours à une analyse de statique graphique, dite de l'épure de Méry, permet de mettre en évidence et représenter la descente des charges et la direction des efforts, leur intensité et les parties de bâtiment les plus sollicitées. Cette approche graphique, réduite à une section de coupole, ne permet évidemment pas une analyse exhaustive d'une structure tridimensionnelle exposée à tous types de sollicitations mais elle a l'avantage d'illustrer les implications structurelles statiques d'une forme de construction et d'illustrer ses faiblesses le cas échéant (fig. 13).

Comme dans toute structure en pierre clavée, l'analyse statique de la coupole de pierre du mausolée de Khayr Bek démontre que, si la composante majeure de l'effort exercé par la coupole sur sa base est la charge verticale, il n'en résulte pas moins une poussée horizontale

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

non négligeable. La stabilité de la coupole est garantie par la répartition homogène du poids et par la maîtrise des poussées horizontales. Or on peut observer qu'aucun arc-boutant ou contrefort extérieur ne viennent retenir les poussées horizontales, mais que c'est l'épaisseur des murs de la zone de transition qui permet de neutraliser les poussées et les transformer en charges verticales.

On peut expliquer par des motivations techniques des bâtisseurs la structure spécifique de la coupole associant tas de charge et clavage, qui offre non seulement l'avantage de minimiser les poussées horizontales en élevant le point de départ du clavage mais aussi de rendre possible la mise en œuvre des 15 premières assises du tambour et de la coupole sans étaiement. Par ailleurs, le succès au Caire de la forme des coupoles surhaussées portées par un haut tambour peut s'expliquer par l'efficacité structurelle de cette forme proche de l'ellipse[7].

Il reste à évaluer le rôle structurel des cales de bois disposées dans les joints horizontaux et des agrafes en fer liant deux à deux les pierres des assises 17 à 28 (fig. 20). Les cales de bois ont servi à la pose et au réglage de chaque assise de pierres et ont été ensuite noyées dans le mortier de plâtre. Elles ne sont sollicitées que lorsque le mortier se détériore, mais dans le cas opposé, elles ne jouent aucun rôle structurel actif.

On ne peut comprendre la fonction des agrafes de fer qu'en tentant de localiser leur présence dans la coupole (fig. 17, 18, 19). Il apparaît que des traces de fissuration caractéristiques de la présence d'agrafes en fer corrodées apparaissent dès l'assise 17, tandis que des agrafes ont été mises au jour dans les assises 18, 23, 24 et 28. Elles ont donc été utilisées par les bâtisseurs dans la partie de coupole comprise entre les assises 17 et 28, qui correspond à la zone où la structure en tas de charge fait progressivement place à une structure clavée où l'inclinaison des joints d'assise augmente. Les agrafes en fer semblent agir dans chaque assise comme un chaînage horizontal censé prévenir tout déplacement horizontal. Ces agrafes ont-elles été placées par les bâtisseurs pour renforcer la structure en pierre dans les assises les plus sollicitées ou sont-elles disposées lors de la construction dans le but de réduire la pression sur l'étaiement ? Les deux hypothèses sont probables et leurs avantages peuvent être complémentaires. Cependant, on constate aujourd'hui que la corrosion des agrafes en fer a causé l'éclatement de fragments de pierres et que des lignes de fissuration obliques sur plusieurs assises sont apparues sous l'effet combiné de secousses sismiques et de la fragilisation de l'appareil en pierre de taille. L'effet bénéfique escompté des agrafes en fer sur la structure n'a donc pas survécu aux dégradations du fer.

Coordination du décor extérieur et de la structure

Le décor végétal et géométrique qui orne l'extrados de la coupole suscite l'admiration par la régularité de son tracé et la qualité de sa sculpture en ronde bosse (fig. 21, 22). Une analyse attentive de la relation entre le décor et le système de construction de la coupole du mausolée

7. L'ellipse, ou plus précisément la chaînette inversée, forme la ligne courbe d'efforts ne créant aucune poussée horizontale et impliquant une descente des charges purement verticale. Les bâtisseurs médiévaux ont certainement perçu les potentiels de cette formule, notamment pour les coupoles de mausolée dont le contre-butement n'était pas envisageable par manque de structure d'appui.

© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

de Khayr Bek permet de mettre en lumière le lien indissociable entre structure et ornementation qui caractérise ce type de construction. L'étude de la sculpture extérieure en entrelacs floraux montre en effet que la structure de la coupole est déjà bâtie et ses joints de mortier réalisés lorsque le sculpteur intervient pour graver le programme décoratif et les inscriptions coraniques dont les lignes sont incisées dans les joints de mortier de construction. En ce sens, les sculpteurs opèrent par ravalement d'un parement extérieur brut. En terme d'organisation du chantier, cela prouve que l'intervention des bâtisseurs de la structure en pierre de taille et celle des sculpteurs étaient successives. Il est d'ailleurs tout à fait probable que bâtisseurs de la structure en pierre de taille et sculpteurs formaient deux groupes de travail distincts. Pourtant, la comparaison de la composition du décor extérieur et du calepin de pierre de taille montre que ces deux groupes de travail coordonnaient leurs efforts dès l'étape de la planification de l'ouvrage. En effet, la sculpture décrit 16 motifs décoratifs identiques ordonnés à partir de 16 axes verticaux le long du parement extérieur qui convergent au sommet de la coupole. Or, le relevé du calepin de pierre de taille révèle que le nombre de pierres par assise est un multiple de 16 : de 32 pierres à partir du bas pour les assises 1 à 28, le calepin passe à 16 pierres jusqu'au sommet pour les assises 29 à 35. Les joints verticaux se superposent ainsi parfaitement pour former des génératrices de 32 puis 16 axes convergents. Ce sont ces axes qui servent de guides pour les sculpteurs dont la composition en 16 motifs décoratifs suit parfaitement l'alignement vertical des joints de construction (fig. 8, 22, 23, 24).

La correspondance du programme sculpté avec le système de construction démontre que, dans le cas de la coupole du mausolée de Khayr Bek, la définition du projet et l'exécution ont fait l'objet d'une coordination minutieuse réunissant l'ensemble des corps de métiers de la pierre [8].

Mise en œuvre et construction

Les sources écrites n'offrent que peu d'informations quant à l'organisation d'un chantier médiéval au Caire. C'est ainsi par l'étude de l'édifice lui-même et des traces qu'a laissées la construction que l'on peut tenter de reconstituer les étapes et les procédés de mise en œuvre.

En ce qui concerne la taille de pierre, la standardisation de chaque assise de la coupole en 32 pierres de dimensions identiques a pour conséquence la possibilité pour les tailleurs de pierre d'utiliser un seul et même panneau par assise et, de ce fait, de préfabriquer les pierres de chaque assise sans risque de perte ou d'erreur. La taille de pierre s'effectue au sol afin de limiter la manutention et le levage aux seuls produits finis. Simultanément, les charpentiers et ferronniers procèdent à la fabrication des cales en bois, des éléments d'étaiement et des crampes

8. L'observation des coupoles proches du mausolée de Tarabay et des deux mausolées de la mosquée d'Um al-Sultān Šaʿbān confirme le souci des bâtisseurs de faire correspondre la position des joints verticaux avec les lignes directrices des motifs sculptés de l'extrados, quel qu'en soit le dessin. Dans la coupole de Tarabay, le décor en zigzag formé de 40 motifs suit parfaitement la base du calepin fondé sur des assises annulaires de 40 pierres. Les deux coupoles de la mosquée d'Um al-Sultān Šaʿbān sont ornées de godrons dont le nombre correspond exactement au nombre de pierres d'assises de leur base : 36 pour la grande coupole et 24 pour la petite coupole.

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

en fer. L'absence de traces laissées dans les parements de la coupole par l'échafaudage vertical et l'étaiement du fait de la sculpture et du ravalement ultérieur rend difficile toute hypothèse de reconstitution de ces ouvrages. L'échafaudage se différencie de l'étaiement par sa seule fonction de permettre l'accessibilité de toutes les parties de l'édifice aux équipes d'ouvriers et peut se limiter à une simple ossature de perches liées entre elles par des fibres végétales, tandis que l'étaiement doit fournir une structure temporaire sous l'intrados de la coupole pendant la mise en œuvre avant la pose du couronnement et la prise du mortier. La construction d'un étaiement de coupole consiste en général en un cintre en bois de grande dimension, or l'Égypte est un pays pauvre en bois de charpente indigène et l'essentiel des essences utilisées à la période mamlouke au Caire était importé. Il est donc tout à fait probable que les bâtisseurs de la coupole du mausolée de Khayr Bek aient conçu le cintrage avec pour critère premier d'économiser l'utilisation du bois et ce faisant, aient développé un procédé d'étaiement spécifique.

L'analyse de la construction suggère que la combinaison de différents systèmes structurels adoptés dans la coupole ait eu pour objectif de limiter l'étaiement à son minimum. En effet, la construction par assises horizontales ou presque du tambour et de la base de la coupole (des assises 1 à 21) ne nécessite pour des raisons architectoniques pas de cintrage. D'autre part, la partie de coupole dont le jointoiement s'incline pour passer progressivement d'un tas de charge à un clavage (des assises 22 à 28) requiert un cintrage robuste ; mais la pose de crampes en fer pendant la construction pour lier les pierres d'assises deux à deux, simultanément à la pose d'étrésillons horizontaux en bois (fig. 28) permet de maintenir les pierres dans leur position initiale. Enfin, pour la partie supérieure de la coupole (des assises 29' à 35') seul un cintrage de taille relativement modeste et soumis à une charge modérée est nécessaire. Celui-ci peut être porté par l'échafaudage intérieur, ou plus avantageusement, peut se composer d'étrésillons horizontaux en bois disposés de manière radiale. Dans toutes ces étapes, l'utilisation de cales de bois et la prise rapide et le haut coefficient de friction du mortier de construction au plâtre permettent une grande rapidité d'exécution.

La limitation des dimensions des pierres à un gabarit maximal de 60 × 34 × 39 centimètres (dans les assises 10 à 12) – ce qui correspond à une masse approximative de 200 kilogrammes – permet de réduire les difficultés de levage et de manutention. Il reste que lever des pierres de cette masse à une altitude d'une vingtaine de mètres requiert un treuil muni de poulies de démultiplication. L'absence de traces de griffes de levage ne fournit pas d'information concernant le mode de levage des pierres.

Les opérations de taille de pierre, de sculpture et de ravalement des parements ont laissé sur l'édifice des traces significatives qui permettent de restituer les étapes de la mise en œuvre et les rôles respectifs de la taille de pierre et de la sculpture de finition. Le processus de taille lui-même a pour objectif de façonner les pierres d'assises selon un calepin prédéterminé afin de permettre la construction de la coupole, à laquelle succèdent les différentes étapes de finition, ayant pour buts de réaliser la courbure intérieure et extérieure de chaque pierre et d'exécuter le programme de sculpture. Les traces de finition sont, pour des raisons de conservation, visibles

© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

principalement sur l'intrados de la coupole (voir les figures 26 et 27) et permettent de déduire qu'une finition est réalisée après la pose des pierres car une trace d'outil donnée couvre autant une partie de parement de pierre que de joint vertical ou horizontal. Ces traces proviennent de deux types d'outils : des gradines dentelées et des taillants droits ; elles sont disposées sans recherche d'orthogonalité ou de parallélisme, dans le seul but d'obtenir une surface concave. C'est donc un ravalement général des parements intérieurs qui a lieu après la construction de la coupole. À l'extérieur, la sculpture du décor d'entrelacs végétaux porte indifféremment sur la pierre et les joints de mortiers, apportant une preuve supplémentaire d'une intervention globale de sculpture et de ravalement après l'achèvement de la coupole.

Conclusion

Les observations exposées au cours de cette étude mettent en lumière la qualité de la conception et de l'exécution de la coupole du mausolée de Khayr Bek. L'analyse technique des composantes de cet édifice permet, à partir du recoupement d'indications souvent ténues, de tenter de reconstituer les étapes du processus de développement de ce projet et d'émettre des suppositions quant aux desseins des bâtisseurs et à l'organisation du chantier.

Au vu de la grande précision de l'ouvrage et de la complexité tridimensionnelle de certains détails de construction, il est difficile de concevoir aujourd'hui la réalisation de cet édifice sans recours au dessin des panneaux de faces des pierres à tailler. Il est probable que les maîtres d'œuvre médiévaux aient eu recours aux tracés de taille de pierre qui, n'ayant guère été formalisés ni fait l'objet de traités savants, se sont perdus. La transmission des connaissances techniques nécessaires à la planification et la réalisation de tels ouvrages se faisaient probablement par voie orale sur le chantier et l'expérience était le fondement du savoir.

La mise en œuvre des pierres de taille grâce à la pose de cales en bois est un procédé que l'on observe dans de nombreuses constructions de la période mamlouke ; c'est pourtant la disposition systématique des cales au nombre de deux par pierre et toujours au même emplacement par rapport aux joints verticaux qui caractérise cette coupole. L'usage avéré d'agrafes en fer dans la construction d'une coupole en pierre de taille du début du XVI^e^ siècle au Caire constitue une donnée inédite dans la connaissance des méthodes de construction médiévales qui invite à poursuivre des recherches dans cette direction. En Europe, l'intérêt pour le fer dans la construction ancienne a connu un renouveau depuis une quinzaine d'années grâce aux observations faites sur plusieurs cathédrales gothiques dont la structure en pierre de taille était renforcée de tirants en fer indispensables à leur stabilité[9]. La question du fer dans les monuments dépasse le seul champ des historiens des techniques et intéresse l'ensemble des professionnels de la construction en fournissant une réponse historique aux sollicitations sismiques.

9. Parmi les nombreuses recherches concernant le fer dans les constructions médiévales, on peut citer en France : Taupin, *Le fer dans les architectures médiévales*, ou *id.*, « Le fer des cathédrales ».

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

La relation directe entre le système structurel et le décor sculpté de l'extrados ainsi que la prépondérance du système en tas de charge au clavage de la structure démontre la recherche de perfection technique des bâtisseurs dans la conception de l'ouvrage et sa mise en œuvre. Les réponses techniques données aux différentes composantes de la coupole sont le fruit d'une conception synthétique de l'art de bâtir que le maître d'œuvre développe avec virtuosité et pour lesquelles on peut véritablement parler d'une véritable « esthétique technique ».

Références bibliographiques

Choisy, Auguste, *Histoire de l'architecture*, II. *Architectures musulmanes*, réédition Bibliothèque de l'Image, 1996.

Hahnloser, Hans R., « Villard de Honnecourt – Kritische Gesamtausgabe des Bauhüttenbuches ms. fr 10093 der Pariser Nationalbibliothek », Graz, 1972.

Kessler, Christel, *The Carved Masonry Domes of Mediaeval Cairo*, The AUC Press, 1976.

Taupin, Jean-Louis, *Le fer dans les architectures médiévales*, Icomos-France, 1996.

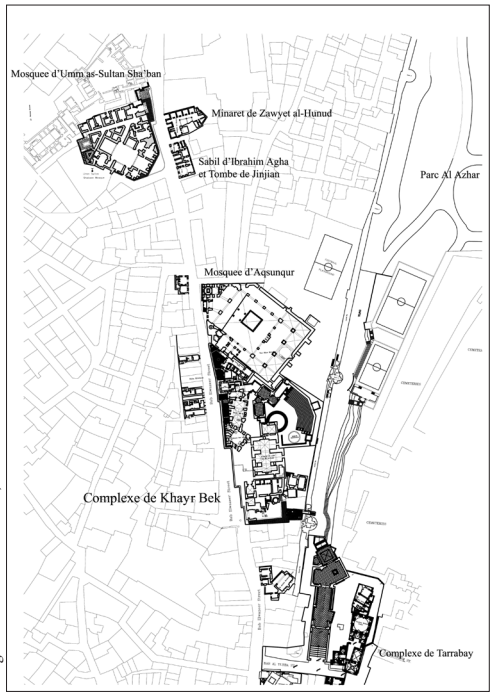
—, « Le fer des cathédrales, naissance d'une réflexion et son évolution : l'exemple de Beauvais », colloque *Emploi du fer et du plomb dans l'architecture gothique*, Noyon, Novembre 2006.

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net



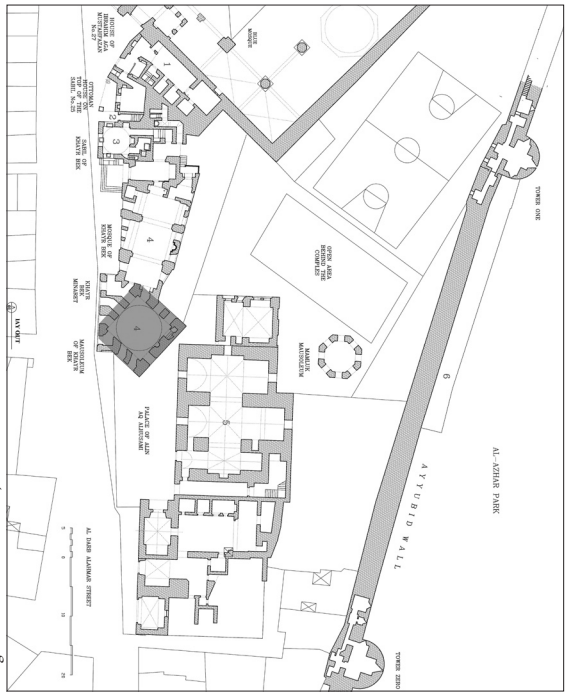
© Google Earth 2006

Fig. 1. Le district de Darb al-Aḥmar.



© Aga Khan Trust for Culture, 2006

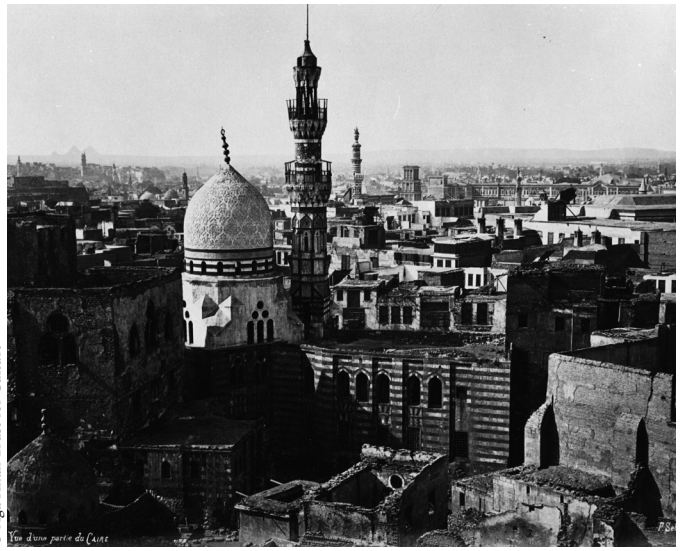
Fig. 2. Le quartier de Bāb al-Wazīr et ses monuments.



© Aga Khan Trust for Culture, 2006

Fig. 3. Plan de situation du complexe de Khayr Bek.

© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net



© Aga Khan Trust for Culture

Fig. 4. Photographie ancienne des années 1880.


© Aga Khan Trust for Culture, Adrien Buchet, 2006

Fig. 5. Élévation sud du mausolée de Khayr Bek et rue Bāb al-Wazīr.

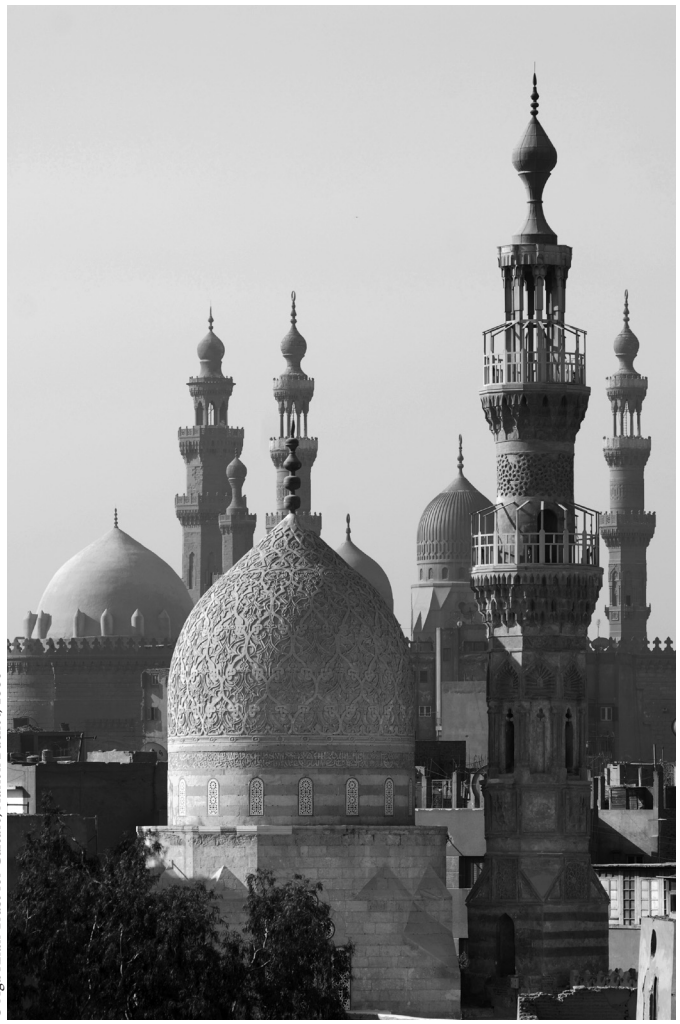

© Aga Khan Trust for Culture, Adrien Buchet, 2006

Fig. 6. Vue de la coupole depuis le nord.

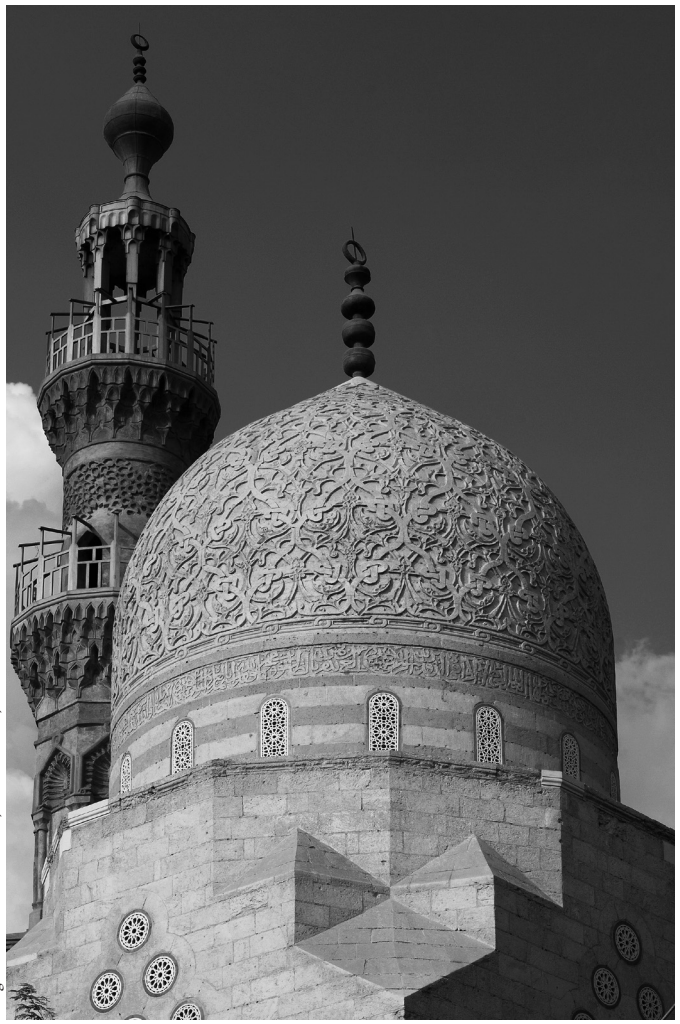

© Aga Khan Trust for Culture, Adrien Buchet, 2006

Fig. 7. Vue de la coupole depuis le sud.

© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net


© Aga Khan Trust for Culture, Adrien Buchet, 2006

Fig. 8. Détail de la base de la coupole.

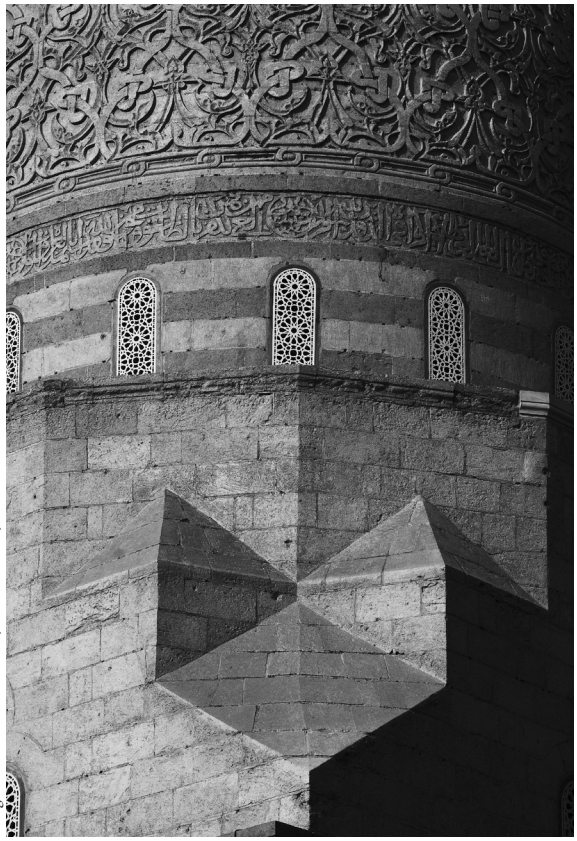

© Aga Khan Trust for Culture, Adrien Buchet, 2006

Fig. 9. Détail de la zone de transition, des pyramidions et des baies hautes.


© Aga Khan Trust for Culture, Adrien Buchet, 2006

Fig. 10. Vue intérieure de la coupole du mausolée de Khayr Bek.

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

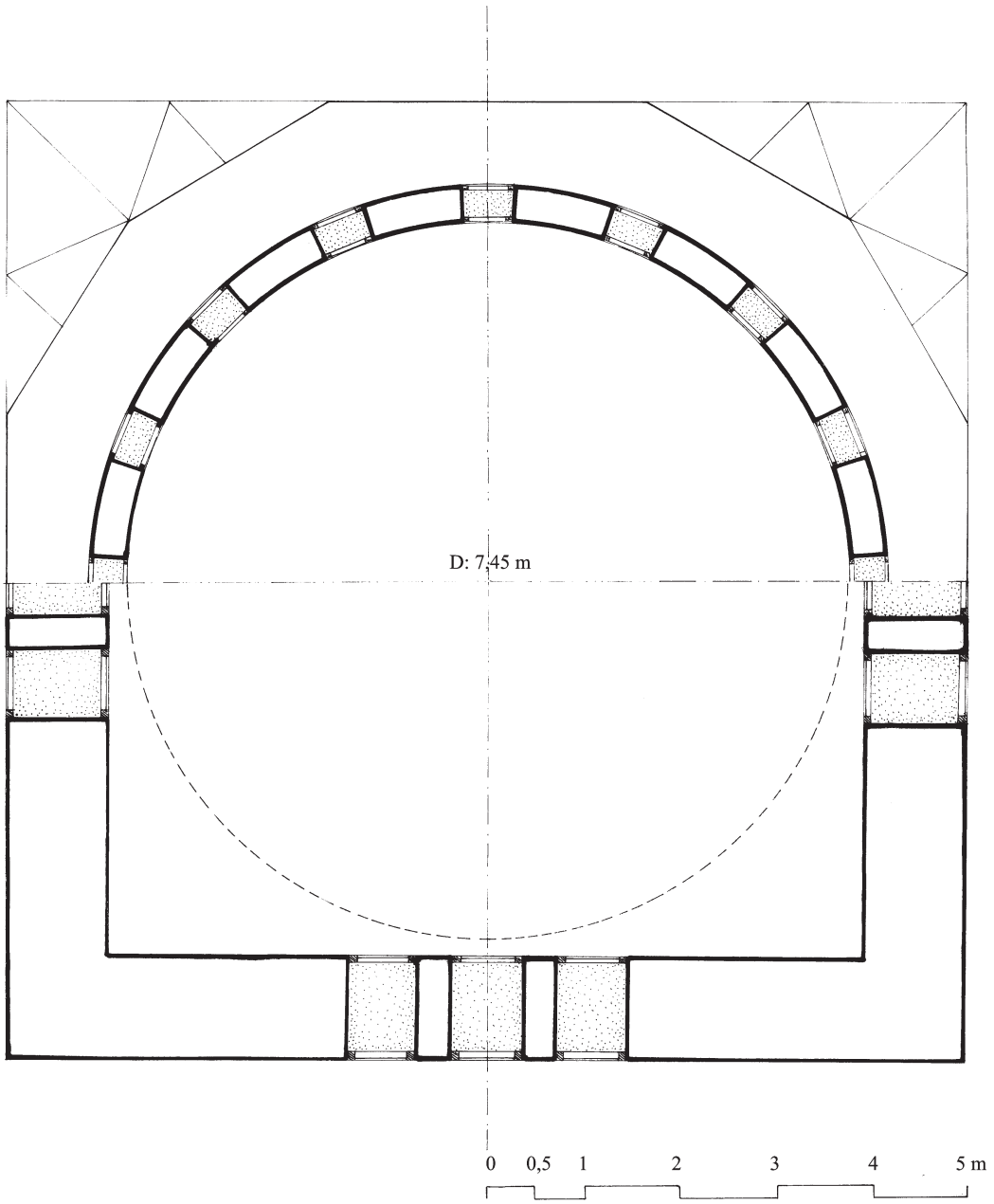


Fig. 11. Plans de la base et de la coupole.

© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

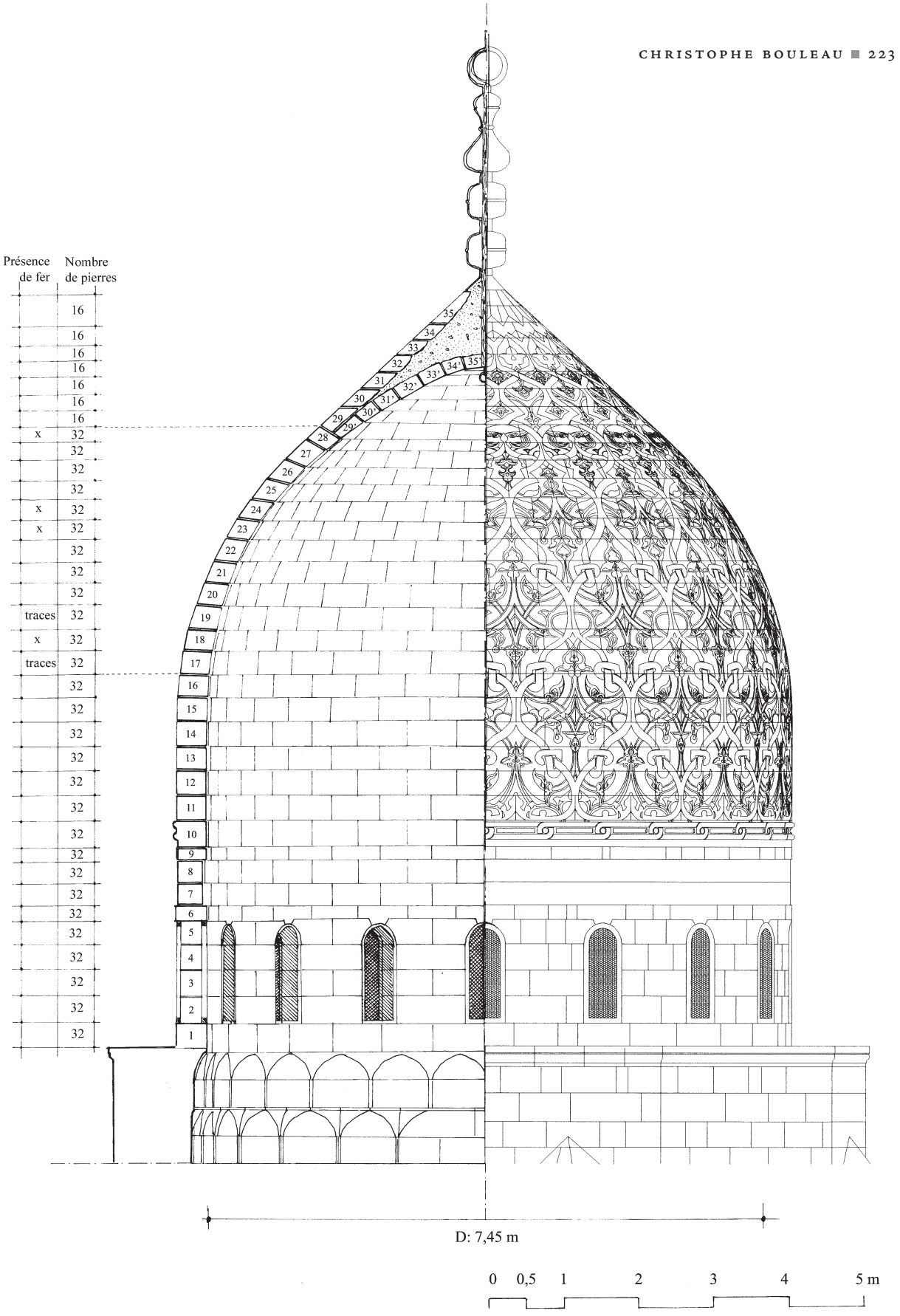


Fig. 12. Coupe-élévation de la coupole.

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

Calculs des charges:

V_1= 1,37m3
P_1= 3,44 t

V_2= 1,19 m3
P_2= 2,98 t

V_3= 1,09 m3
P_3= 2,74 t

V_4= 0,23 m3
P_4 = 0,57 t

V_5= 0,08 m3
P_5= 0,2 t

V_6= 0,3 m3
P_6= 0,52 t

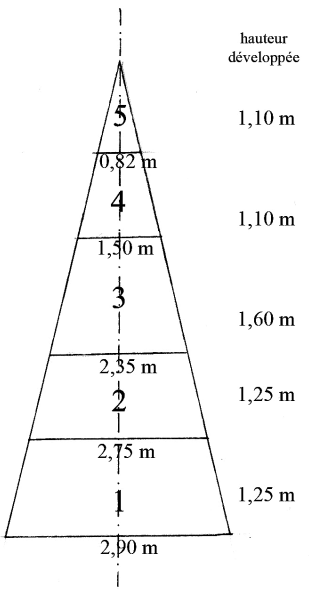
V_7= 0,38 m3
P_7= 0,7 t

Densités:

Pierre de taille : 2,5
Maçonnerie : 1,8

Surface en plan de référence:

1/16 surface de la coupole



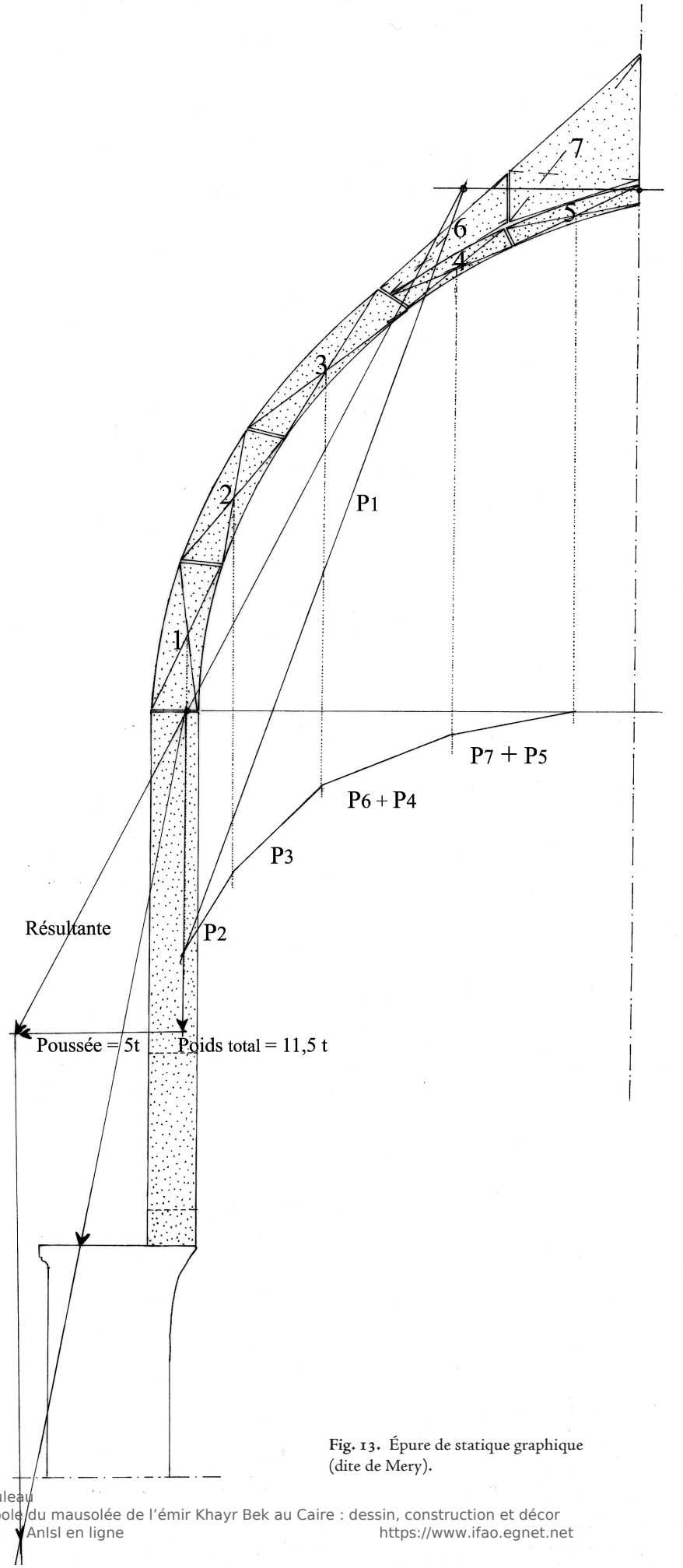


Fig. 13. Épure de statique graphique (dite de Mery).

© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

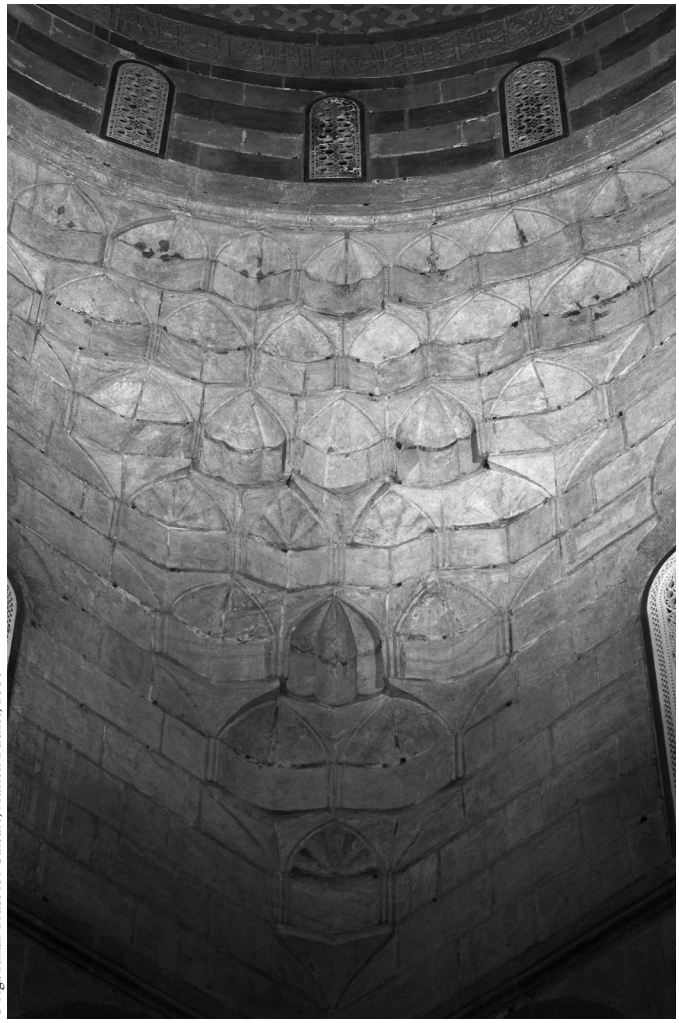

© Aga Khan Trust for Culture, Adrien Buchet, 2006

Fig. 14. Détail de la zone de transition et des *muqarnas*.

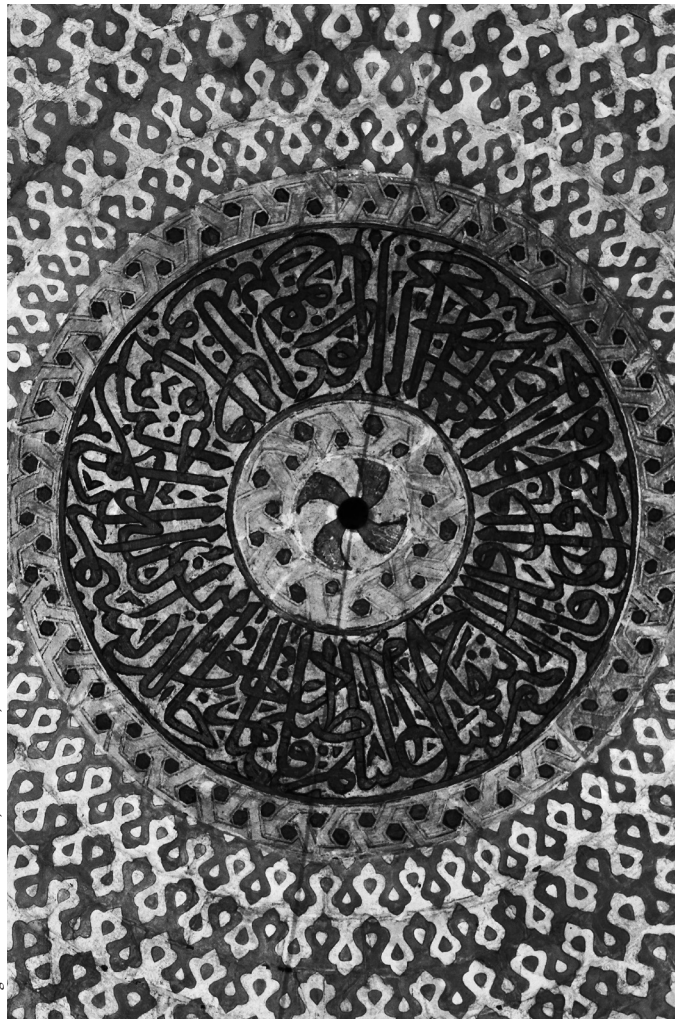

© Aga Khan Trust for Culture, Adrien Buchet, 2006

Fig. 15. Détail de la rondelle d'inscription au sommet intérieur de la coupole.



Fig. 16. Détail de la fissure caractéristique de corrosion de l'agrafe en fer.

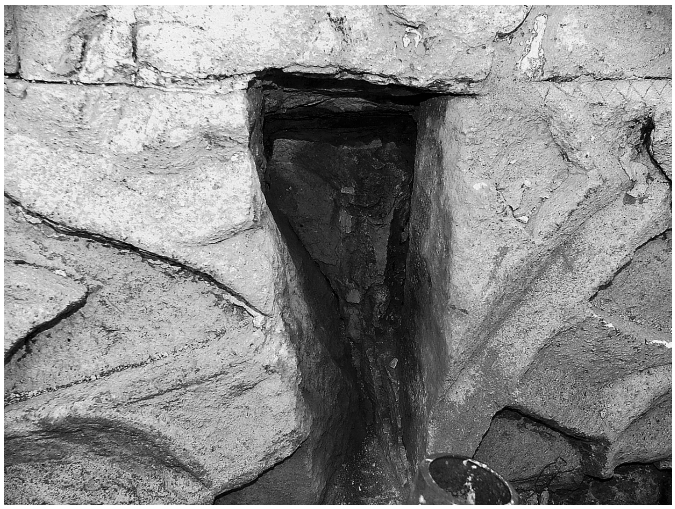


Fig. 17. Détail d'une agrafe en fer.

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net



Fig. 18. Détail d'une agrafe en fer.

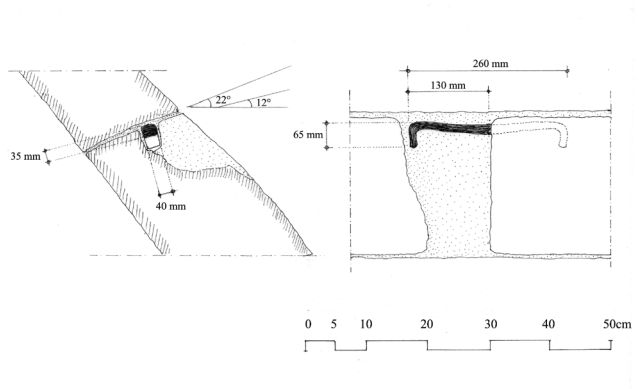


Fig. 19. Détail d'une agrafe en fer.

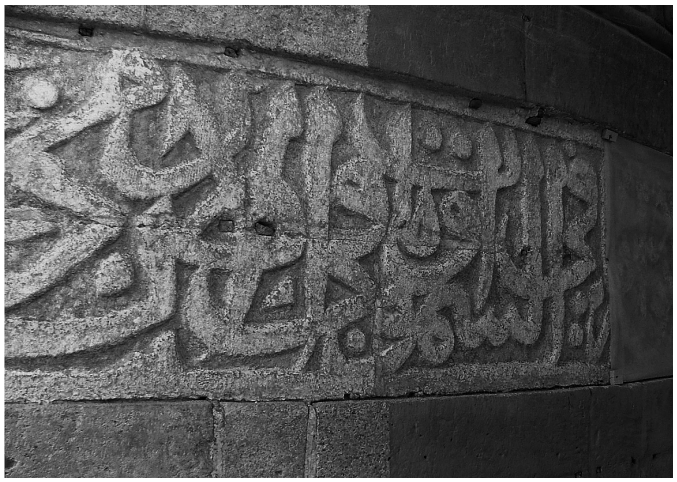


Fig. 20. Détail des cales en bois.



Fig. 21. Détail du sommet de la coupole avant restauration.



Fig. 22. Détail de la relation entre construction et décor, avant restauration.



Fig. 23. Détail de dépose d'une pierre du cône sommital.

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net



Fig. 24. Détail de la relation entre construction et sculpture du décor.



Fig. 25. Détail des vestiges de badigeon de chaux sur l'extrados de la coupole.



Fig. 26. Traces d'outils de ravalement intérieur, avec traces de taillant droit sur les joints.



Fig. 27. Traces d'outils de ravalement intérieur, avec traces de gradine à dents.

AnIsl 41 (2007), p. 209-228 Christophe Bouleau
Bâtir une coupole en pierre de taille. La coupole du mausolée de l'émir Khayr Bek au Caire : dessin, construction et décor
© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net

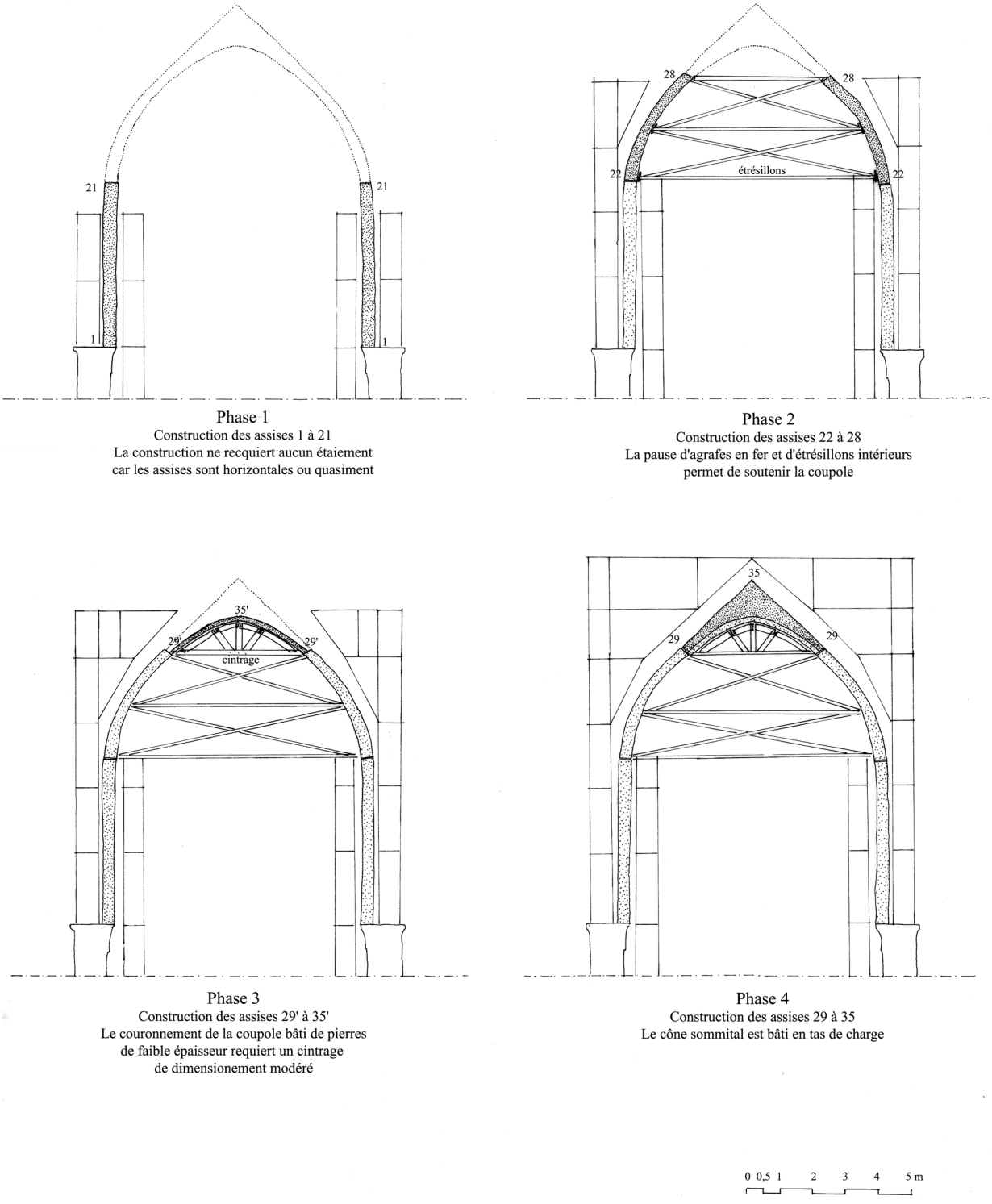


Fig. 28. Hypothèse de phasage de la mise en œuvre.

© IFAO 2026 AnIsl en ligne https://www.ifao.egnet.net