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

BULLETIN
DE L'INSTITUT FRANÇAIS
D'ARCHÉOLOGIE ORIENTALE

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

BIFAO 97 (1997), p. 293-311

Pierre Zignani, Nicolas Nilsson

Étude architecturale et modélisation des structures au temple d'Hathor à Dendera.

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

9782724710540	*Catalogue général du Musée copte*	Dominique Bénazeth
9782724711233	*Mélanges de l'Institut dominicain d'études orientales 40*	Emmanuel Pisani (éd.)
9782724711424	*Le temple de Dendara XV*	Sylvie Cauville, Gaël Pollin, Oussama Bassiouni, Youssreya Hamed
9782724711417	*Le temple de Dendara XIV*	Sylvie Cauville, Gaël Pollin, Oussama Bassiouni
9782724711073	*Annales islamologiques 59*	
9782724711097	*La croisade*	Abbès Zouache
9782724710977	*???? ??? ???????*	Guillemette Andreu-Lanoë, Dominique Valbelle
9782724711066	*BIFAO 125*	

© Institut français d'archéologie orientale - Le Caire

Étude architecturale et modélisation des structures au temple d'Hathor à Dendera

Pierre ZIGNANI, Nicolas NILSSON

UNE ÉTUDE architecturale devrait permettre d'appréhender sous l'angle des techniques de construction, du vocabulaire d'architecture et de la composition spatiale la pensée des concepteurs, façonnée par l'histoire de leur civilisation, qui a généré les évolutions technologiques, stylistiques et typologiques. En Égypte pharaonique, l'évolution de l'architecture cultuelle monumentale manifeste une permanente recherche de durabilité qui est fort logique si l'on considère que l'art religieux transpose au niveau de la construction des éléments du présent et du mythe d'origine dans une structure pour l'éternité [1]. D'une architecture des premiers temps de cette culture, conditionnée par son milieu, faite de limon et de végétaux, on évolua vers une construction de brique et de pierre conservant, dans un registre ornemental, les éléments caractéristiques et structurels de la phase primitive. Les mastabas, les forteresses de Nubie et les pyramides du Fayoum et de Dahchour montrent assez tôt une grande maîtrise de la brique pour l'édification de vastes programmes, et les vestiges de palais royaux du Nouvel Empire attestent que ce matériau n'était pas incompatible avec la réalisation de projets nobles et grandioses. De fait, la pierre appareillée est réservée à l'architecture cultuelle et funéraire, à l'exception d'ouvrages en relation avec l'eau du Nil et ceux que nous classons aujourd'hui dans le génie hydraulique comme le barrage de retenue d'eau construit à l'Ancien Empire au ouadi Gerawi [2]. Toutefois si la pierre est destinée aux programmes religieux, la brique de limon fut très largement employée pour des chapelles urbaines ou des temples plus modestes. Dans ces derniers cas, l'argument économique est certainement l'hypothèse la plus appropriée en faveur de ce choix d'un matériau disponible sur place et au travail facile.

Nicolas Nilsson, ingénieur des Mines, a été affecté au titre de la coopération sur un financement de l'INERIS auprès du Centre d'ingénierie pour l'archéologie et l'environnement de l'université du Caire (ECAE). Le travail de modélisation présenté ici est le fruit d'une collaboration entre l'IFAO et l'ECAE mise en place sous l'impulsion des professeurs Hani Helal et Taha Abdallah et qui a fait l'objet d'un travail de DEA intitulé « Modélisation géotechnique et archéologie », présenté en octobre 1996 à l'Institut polytechnique de Lorraine.

1 Fr. DAUMAS, *La civilisation de l'Égypte pharaonique*, Paris, reéd. 1987, p. 395.

2 La datation du barrage du ouadi Gerawi a été estimée autour de la IIIe dynastie d'après la céramique et une analyse au ^{14}C dans l'étude récente de G. GARBRECHT et H.-U. BERTRAM, *Der Sadd-el-Kafara*, *Mitteilungen aus dem Leichtweiss-Institut für Wasserbau* 81, 1983.

Les qualités de la pierre, notamment sa résistance, compensaient grandement les difficultés d'extraction, de transport, de mise en œuvre et de décoration quand il s'agissait de bâtir la structure où les dieux, par leur activité, devaient, dans un cadre mythique et préservé de l'extérieur, garantir l'ordre de l'univers [3]. La vallée du Nil a conservé trop peu de vestiges de temples antérieurs au Nouvel Empire pour permettre à ce jour d'établir un inventaire complet des évolutions techniques avant cette période. En revanche, l'essor des programmes cultuels entrepris de la XVIIIe dynastie aux grandes opérations ptolémaïques et romaines nous a laissé un magnifique catalogue des problèmes constructifs et de leurs solutions. À travers les vestiges et monuments préservés, on a la possibilité d'observer une évolution continue de la construction qui reflète de la part des concepteurs une réflexion sur leur architecture et les problèmes techniques auxquels ils étaient confrontés. Mauvaises fondations, maçonnerie de parement avec fourrure de tout-venant, secousses sismiques, réactions d'appui du sol insuffisantes et exhaussement du cours du Nil (donc de la nappe phréatique) furent autant de facteurs de destruction coexistants qui ruinèrent les gigantesques complexes cultuels et qui suscitèrent une évolution qualitative de la cohésion des murs et des fondations [4].

Dans cette civilisation dont le fonctionnement du temple garantit l'existence, il est manifeste que les choix technologiques, stylistiques et typologiques que nous observons au niveau de la structure architectonique dépassent la simple évolution d'une tradition vernaculaire et sont conditionnés par les facteurs politiques, idéologiques et économiques qui affectent la société.

Évolution technologique et pensée constructive

L'étude architecturale en cours à Dendera au temple d'Hathor nous a déjà permis de reconnaître une évolution aboutissant à une réelle tentative d'optimisation des techniques au moment de l'édification de ce dernier, à la fin de la période ptolémaïque et au début de la période romaine. Il y a là une accélération dans la logique d'amélioration des qualités de construction qui s'observe depuis le règne des Nectanebo. Le soin apporté aux fondations, la recherche de réduction du poids propre des éléments structurels, l'amélioration du jointoyage des blocs dénotent une approche raisonnée de la part des concepteurs pour assurer au temple la plus grande stabilité structurelle possible.

Parvenu à ce degré de réflexion on est en mesure de se demander si le niveau technologique développé dans la réalisation des monuments en grand appareil de grès n'était pas arrivé à la

3 Sur la destination et le fonctionnement du temple voir la définition de S. Sauneron dans G. Posener, S. Sauneron, J. Yoyotte, *Dictionnaire de la civilisation égyptienne*, Paris, 1959, p. 282 sq. et Cl. Traunecker, « De l'hiérophanie au temple », dans *Religion und Philosophie im alten Ägypten*, *Mélanges Ph. Derchain*, *OLA* 39, Louvain, 1991, p. 301-305.

4 Le passage d'une maçonnerie fourrée vers un mur avec une meilleure cohésion entre la structure interne et les parements débuterait à Karnak autour de la XXIIe dynastie : voir J.-Cl. Golvin, J.-Cl. Goyon, *Les bâtisseurs de Karnak*, Bourges, 1987, p. 112 ; Fr. Laroche-Traunecker, « Les temples », *Sciences et Vie* hors série 197, 1996, p. 112-117. Pour S. Clarke et R. Engelbach la préoccupation d'améliorer les performances des fondations remonterait à la période de la dynastie éthiopienne : voir *Ancient Egyptian Masonry*, Oxford, 1930, p. 76. Quant à l'emploi systématique du mur caisson dans le processus de fondation, il semble qu'il faille attendre la dynastie des Nectanébo pour la voir généralisée : voir P. Zignani « Monolithisme et élasticité dans la construction égyptienne », *BIFAO* 96, 1996, p. 456.

limite du perfectionnement des qualités statiques de la préparation du terrain et de la maçonnerie. Certes une telle évaluation est encore aujourd'hui délicate dans la construction contemporaine et requiert de nombreuses analyses et tests afin d'obtenir des paramètres fiables permettant, grâce à l'outil informatique, de modéliser des éléments architecturaux et de les soumettre à une simulation [5]. En dépit de cette réserve, on peut considérer, concernant la technologie développée par les bâtisseurs anciens, que les multiples soins apportés aux fondations, à l'appareillage et au jointoyage ainsi que le souci d'optimisation des matériaux et des techniques (évident dans le choix de matières différentes pour réaliser les crampons en queue d'aronde en fonction de la vulnérabilité de la partie de la maçonnerie à des sollicitations latérales, principalement les forces d'origine sismique), ne pouvait plus progresser en termes de performances au-delà de petites améliorations formelles ou de multiplications superflues de détails d'agrafage des blocs. L'accrochage d'un bloc par six crampons, tel que nous pouvons le voir au temple d'Hathor de Dendera sur la partie abandonnée en cours de chantier du mur péribole en pierre [fig. 1], paraît suivre une telle logique de redondance, peut-être rassurante, mais qui n'est pas pour autant efficiente, encore moins innovante.

En revanche, le développement de détails d'articulations appartient à une nouvelle manière d'appréhender les désordres structurels et de penser les solutions [6]. D'un raisonnement « statique » sur la résistance on est passé à un raisonnement « dynamique » qui a cherché à gérer les déformations conséquentes aux mouvements subis par un bâtiment dans le temps tout en améliorant la résistance de la structure et en évitant les dégradations qui peuvent altérer l'intégrité structurelle et formelle de la construction. En suivant l'évolution de la maçonnerie en grand appareil de grès, on est en droit d'estimer que cette nouvelle manière de penser la construction intervient au moment où les concepteurs avaient atteint un tel degré de qualité et d'optimisation dans leur construction que celle-ci n'était plus perfectible. Il est ainsi manifeste qu'ils ont pris conscience que la résistance obtenue ne pouvait pas, à la mesure des grands ouvrages, s'opposer aux forces conséquentes aux mouvements du sol. Dès lors leur réflexion s'est reportée à l'échelle du bâtiment, analysant les zones virtuellement sujettes à des efforts de cisaillement et introduisant, au niveau de la maçonnerie sensible à ces forces, des systèmes d'articulation et de découplement.

De la même manière qu'il est malaisé d'estimer qu'un système constructif ne peut plus être perfectible, les performances réelles de ces détails d'articulation sont difficiles à évaluer au-delà de l'observation et de l'analyse qualitative des conséquences dans le temps. Comme exemple de l'estimation des méthodes et des détails mis en œuvre dans les grands programmes cultuels pharaoniques, on peut mentionner la restauration, par G. Legrain, de la salle hypostyle de Karnak avec l'acheminement par traction des monolithes sur des rampes [7]. La viabilité de ce mode de déplacement par traction humaine a été vérifiée par l'exercice grandeur réelle auquel s'est livré H. Chevrier en reconstruisant un traîneau de transport de blocs identique à ceux qui étaient utilisés par les anciens Égyptiens [fig. 2 et 3]. Cette simulation a permis

5 R. Vittone, *Bâtir*, Lausanne, 1996, p. 179-182.
6 P. Zignani, *op. cit.*, p. 468-487.
7 G. Legrain, « Les temples de Karnak », Bruxelles, 1929, p. 164-171.

Fig. 1.
Dendera, temple d'Hathor. Détail de l'agrafage d'un bloc sur le mur péribole en pierre (cliché Alain Lecler, Ifao).

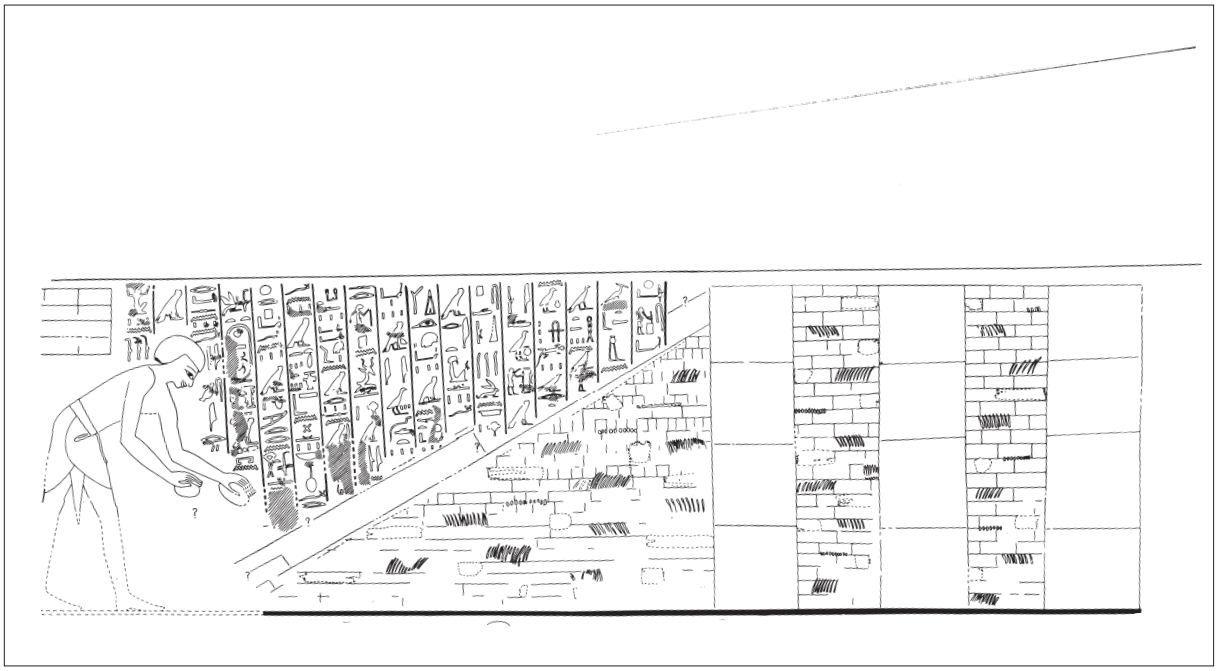


Fig. 2. Représentation d'une rampe de chantier dans la tombe de Rekhmirê. N. G. DAVIES, *The Tomb of Rekhmirê at Thebes, MMAEE,* vol. 2, New York, 1943, réed. 1973, pl. 60).

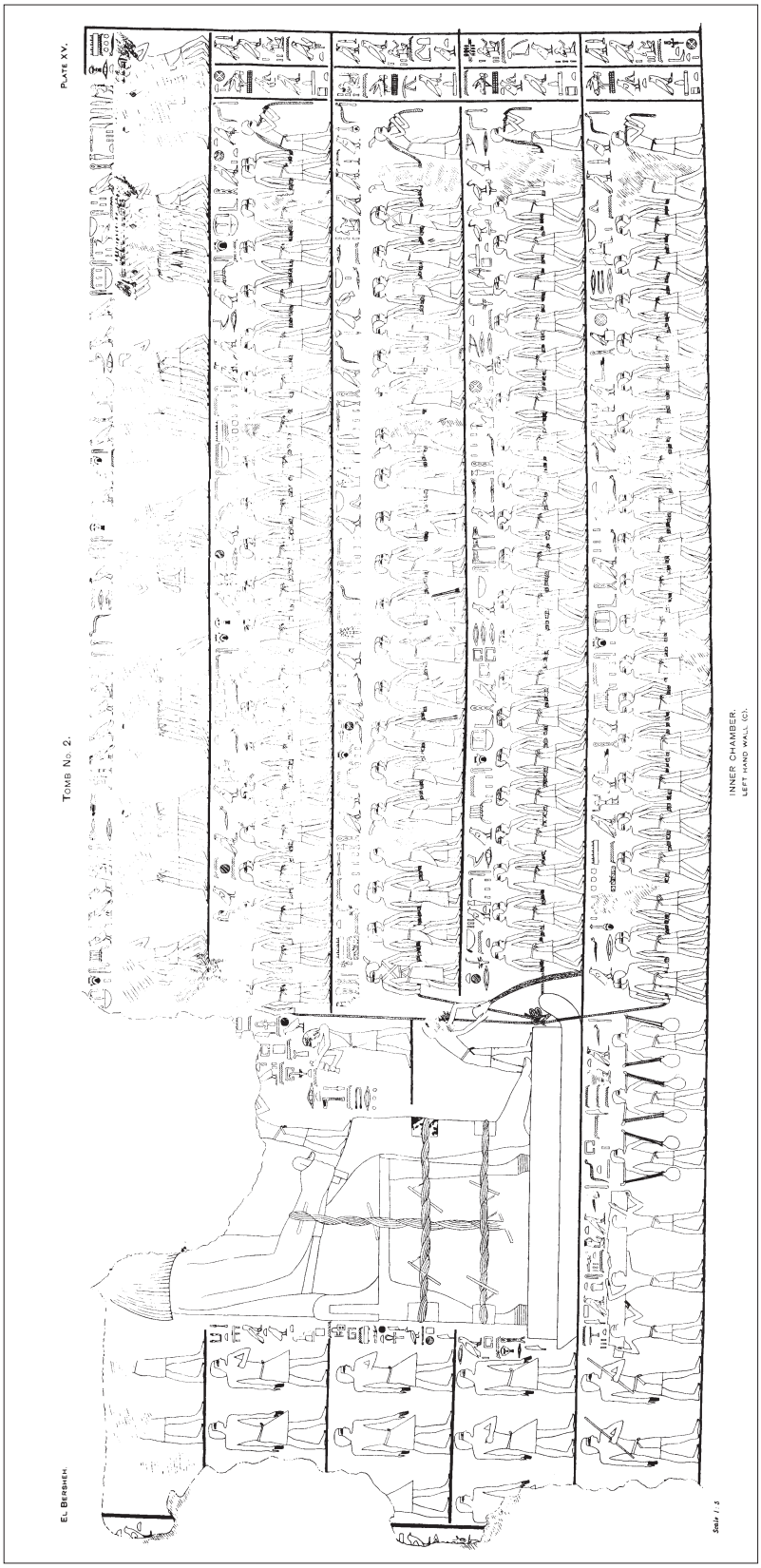


Fig. 3. Représentation d'une statue colossale transportée sur un traîneau tiré par des hommes (noter la lubrification du patin). P. E. NEWBERRY, *El Bersheh* I, Londres, 1892-1893, pl. 15.

d'établir une unité de force de déplacement, sur un plan horizontal, d'une tonne par homme [8]. Si la pertinence du résultat obtenu est indéniable pour approcher l'un des aspects de la logistique des chantiers antiques, il reste pour d'évidentes raisons de faisabilité que ce type de mise en situation réelle est exceptionnel. En revanche, avec les progrès de l'outil informatique, les méthodes développées dans le génie civil et minier pour l'étude et le diagnostic de stabilité de structures ou d'environnements complexes, il devient possible d'approcher par des jeux de simulation une situation existante et d'apprécier quantitativement des performances constructives, donc de vérifier les qualités réelles des solutions que les concepteurs avaient cherché à apporter en développant de nouveaux détails.

Principe de la modélisation numérique de structures architecturales

Pour mener à bien une analyse mécanique de la structure d'un monument, les informations historiques ne suffisent pas. Il est nécessaire de faire appel à des domaines d'étude qui s'intéressent aux structures architecturales et leur interaction avec le milieu ambiant. La géotechnique, qui recourt à la géologie, la mécanique des sols, la mécanique des roches et l'hydrologie, apportent des éléments très utiles quand il s'agit d'étudier la stabilité d'une structure antique. De par la multitude des facteurs intervenant, donc des paramètres à préciser, une telle étude est très souvent d'une grande complexité. Les monuments sont, en effet, caractérisés par leur histoire structurelle, qui comprend souvent différentes étapes de construction avec des matériaux très variés, suivies d'un certain nombre d'événements qui affectent tout bâtiment comme l'altération des matériaux, l'effet des séismes ou de mouvements de terrain ainsi que les altérations propres des structures architecturales.

Dans son principe, la modélisation consiste à simuler concrètement (maquette, simulations en laboratoire) ou mathématiquement (lois physiques, lois de comportements...) une situation réelle que l'on souhaite analyser. Pour cela, il est nécessaire de réunir un grand nombre d'informations sur le sujet étudié. Celles-ci peuvent être qualitatives mais sont, la plupart du temps, quantitatives, pour rendre possible une formalisation déterministe.

La modélisation numérique d'une structure architecturale consiste à simuler sur ordinateur le comportement mécanique de celle-ci. Ceci nécessite de tenir compte de sa géométrie, des interactions entre les différentes parties et des caractéristiques mécaniques des matériaux de construction. En particulier, une étape clé de la réussite d'une modélisation consiste à évaluer les paramètres permettant de décrire le comportement mécanique des matériaux de construction. L'idée est de pouvoir quantifier en vue de décrire, le plus fidèlement possible, des notions comme la dureté, l'élasticité, la raideur, la résistance, la rugosité, l'adhérence, etc.

8 Cet exercice s'est déroulé selon les conditions antiques sur le sol limoneux de la vallée du Nil avec adjonction d'eau pour diminuer la résistance du frottement. Voir H. CHEVRIER, « Technique de la construction dans l'ancienne Égypte », *RdE* 22, 1970, p. 19 sq. Cette unité établie dans des conditions expérimentales est sans aucun doute une valeur maximale bien au-delà de celle correspondant à la pratique ancienne. Les longues distances ou les mouvements du plan de glisse des traîneaux ont certainement abaissé cette valeur de traction que l'on peut prêter à un homme. L'exemple de l'acheminement de la statue de Djehoutihotep depuis les carrières de Hatnoub jusqu'à la ville d'Hermopolis permet justement de proposer une valeur plus basse (voir : P.E. NEWBERRY, *El Bersheh* I, Londres, 1892-1893, pl. 14 et 15). Le texte nous apprend que ce colosse assis faisait 13 coudées de haut. En estimant son volume à 35 m^3,

Cette quantification suit un certain nombre de lois physiques et nécessite la mise en place d'expériences et d'essais pour mesurer et évaluer les paramètres qui interviennent dans ces lois.

De façon schématique, le monument ou la structure est divisé en éléments ou en blocs qui sont en interaction. Les lois phénoménologiques décrivent de façon simplifiée le comportement mécanique des matériaux de construction (représentés dans le modèle par des blocs) et la façon dont ceux-ci se comportent les uns par rapport aux autres.

Un modèle de monument est une simplification de la réalité ; la modélisation implique un grand nombre de choix et de compromis. Les limites à poser sont d'ordre phénoménologique et géométrique. En particulier, il n'est pas toujours utile ou possible de modéliser le comportement de l'édifice en trois dimensions. En effet les calculs tridimensionnels sont longs à mettre en œuvre et il est souvent suffisant de faire une analyse en deux dimensions. La symétrie ou le contexte mécanique (contraintes restant dans un même plan) autorisent souvent une telle réduction. Si la géométrie du site ne s'y prête pas de façon parfaite, une analyse en deux dimensions donne déjà des résultats facilitant l'élaboration d'un éventuel modèle tridimensionnel. Une analyse par modélisation numérique procède par étapes successives : le modèle est rendu plus complexe graduellement, et ceci après avoir, préalablement, analysé et critiqué les résultats de chaque étape.

La modélisation numérique des ouvrages et structures peut encore s'avérer être un apport d'une grande efficacité aux différents niveaux d'un projet de préservation d'un site. Le principal objectif est d'évaluer l'état général de stabilité d'un monument avant et après une intervention. En effet, il devient possible de simuler numériquement une intervention sur le site (renforcement, remontage, excavation...) pour choisir la meilleure façon d'agir [9]. En Égypte, la modélisation numérique a déjà permis d'expliquer l'altération de plusieurs monuments [10] et a fourni, par exemple, de nouvelles voies de recherches aux archéologues sur la pyramide de Khéops, par simple analyse de la fracturation de la chambre du roi [11].

Modélisation entreprise à Dendera

Analyse de la maçonnerie liaisonnée

La première partie de notre étude par modélisation s'est intéressée au rôle joué dans la maçonnerie par les crampons en forme de double queue d'aronde selon l'usage mis en évidence à Dendera [12]. En effet, il a été possible de constater que deux types de crampons ont été utilisés à Dendera selon une disposition prenant en compte la vulnérabilité de

on peut proposer que son poids avoisinait les 70 tonnes. La scène montre quatre équipes de quarante-trois hommes, soit un total de cent soixante-douze personnes, affectées à la traction du monolithe. Si la taille de la statue et la somme des ouvriers tracteurs reflètent bien la réalité, on obtient une valeur de traction de 400 kg par homme.

9 A. AL-SHABRAWI, *Comportement des ouvrages historiques soumis à des sollicitations sismiques,* thèse de doctorat soutenue à l'Institut polytechnique de Lorraine, 1996, p. 129-133.

10 Th. VERDEL, *Géotechnique et monuments historiques. Méthodes de modélisation appliquées à des cas égyptiens*, thèse de doctorat soutenue à l'Institut polytechnique de Lorraine, 1993.

11 P. DÉLÉTIE, J. MONTLUÇON, H. HELAL, « Analyse géomécanique des structures internes de la pyramide de Khéops au voisinage de la chambre du roi », *Symposium international d'Athènes sur la géologie de l'ingénieur appliquée aux travaux anciens, monuments et sites historiques* 1, Rotterdam, 1988, p. 559-565.

12 P. ZIGNANI, *op. cit.*, p. 460-464.

Fig. 4. Dendera, temple d'Hathor. Façade nord du pronaos et localisation de la mortaise remplie de plomb.

Fig. 5. Mortaise remplie de plomb.

l'assemblage des blocs aux sollicitations latérales : des crampons en bois, vraisemblablement dans une essence indigène tel l'acacia, et des crampons en métal (fer, bronze ou plomb). Une variante des crampons métalliques consisterait en un élément dont l'âme serait noyée dans une gangue de plomb coulé sur place [13]. Un logement de queue d'aronde rempli avec du plomb coulé à chaud dissimulé à l'origine sous une couche de mortier a été relevé lors de la mission de l'Ifao au printemps 1997 [fig. 4 et 5] au niveau de l'accrochage du couronnement du mur d'entrecolonnement avec le mur d'ante ouest de la façade principale du pronaos [14].

Dans un premier temps, il était intéressant de comparer le comportement en place de chacun de ces matériaux. Pour ce faire, nous avons simulé une sollicitation horizontale semblable à celle qui touche un monument lors d'un séisme. Des informations sur la qualité des matériaux de construction employés faisant défaut, nous avons exploité les données sur les matériaux modernes les plus proches de ceux employés par les bâtisseurs de l'Égypte ancienne.

La figure 6 donne les résultats de cette première analyse. Dans un domaine de sollicitation moyenne (séisme de faible intensité), les crampons en bois résistent aussi bien que leurs équivalents en bronze. Dans ce cas, la nature des crampons influe peu sur la résistance de la maçonnerie. En revanche, lors de contraintes élevées, le bois cède et seuls les crampons en métal sont efficaces (le bronze a été retenu pour la simulation).

Afin de tenir compte, avec simplicité, de la présence des crampons en bois dans la maçonnerie, il est nécessaire d'entreprendre une étude paramétrée des joints de maçonnerie. La démarche correspond à modéliser, en parallèle, le comportement d'un ensemble de blocs sous contraintes horizontales avec crampons, d'une part, et sans crampons, d'autre part, afin de trouver un modèle dont les caractéristiques mécaniques seraient équivalentes. Cette analyse paramétrique fut entreprise par tâtonnements [fig. 7].

Les calculs indiquent que les joints avec crampons en bois sont mille fois plus résistants au cisaillement horizontal qu'une maçonnerie jointoyée par un mortier seul [15]. Cependant, ces résultats sont à pondérer, car le logiciel utilisé se limite à une analyse plane, ce qui a tendance à faire surestimer le rôle mécanique des crampons.

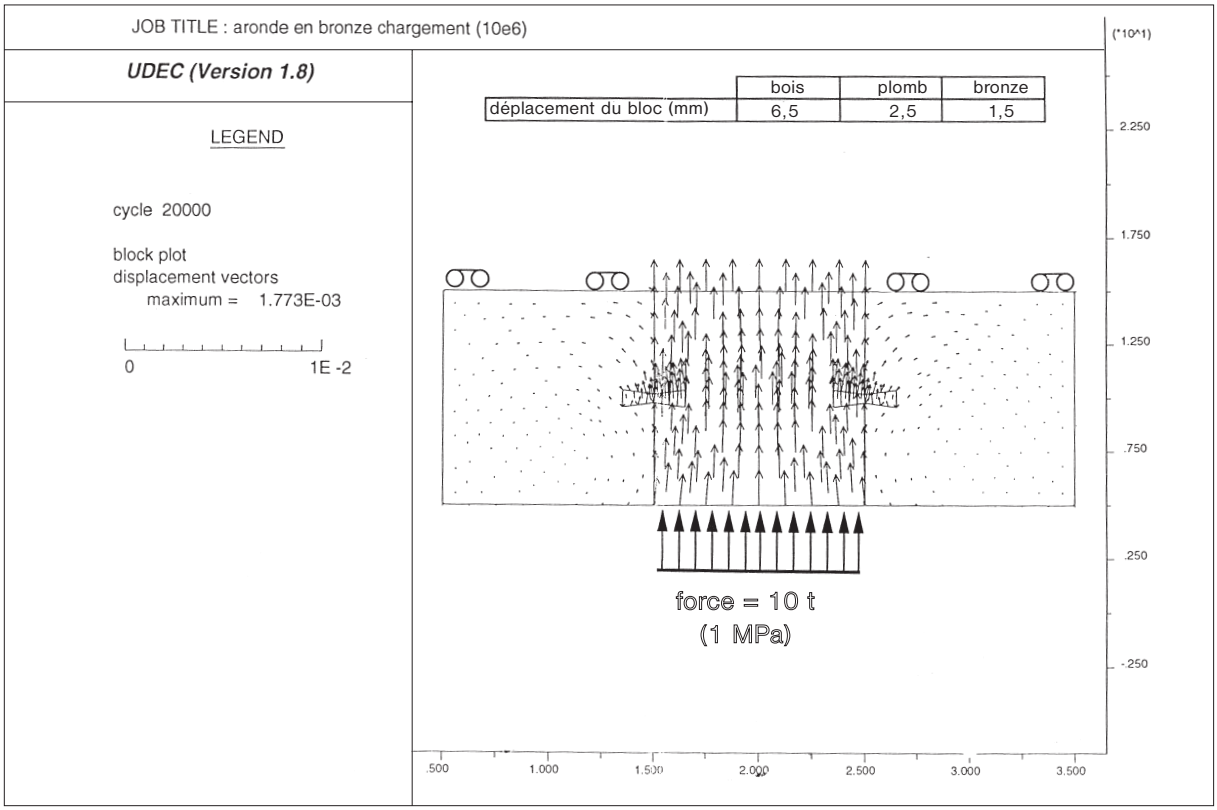
L'évaluation de ces caractéristiques mécaniques équivalentes nous a permis, par la suite, de développer un modèle plus complexe qui s'intéresse à l'articulation entre le pronaos et le naos du temple de Dendera.

13 Cette mise en œuvre est connue dans la Grèce antique où l'emploi de crampons et de goujons en fer était protégé par une couche de plomb afin d'éviter les phénomènes d'oxydation conséquents à l'humidité qui pouvaient dilater et éclater les blocs ainsi liaisonnés. Voir, A. K. ORLANDOS, *Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs,* vol. I, Paris, 1966, p. 112 sq. et vol. II, Paris, 1968, p. 104. Il n'est pas impossible qu'elle ait été employée en Égypte où l'utilisation du fer, du bronze et du plomb a été observée pour la réalisation d'une crapaudine de la porte de Trajan à Douch. Voir, N. GRIMAL, « Travaux de l'Ifao en 1992-1993 », *BIFAO* 93, 1993, p. 455.

14 Le plomb étant laissé en place, il est actuellement impossible de savoir s'il a été coulé tel quel dans la mortaise ou s'il recouvre une agrafe réalisée dans un autre matériau.

15 Cela ne signifie pas qu'une telle maçonnerie est capable de résister à une force 1000 fois plus intense, mais que les déplacements induits sont 1000 fois plus faibles. Par exemple, si une force donnée s'accompagne du glissement d'un bloc sur l'autre de 10 cm en l'absence de crampon, muni de crampon, le bloc ne se déplace plus que d'un millimètre.

Fig. 6. Comparaison des déplacements induits par une force horizontale sur des blocs avec des crampons de différents matériaux (modélisation Nicolas Nilsson, ECAE).



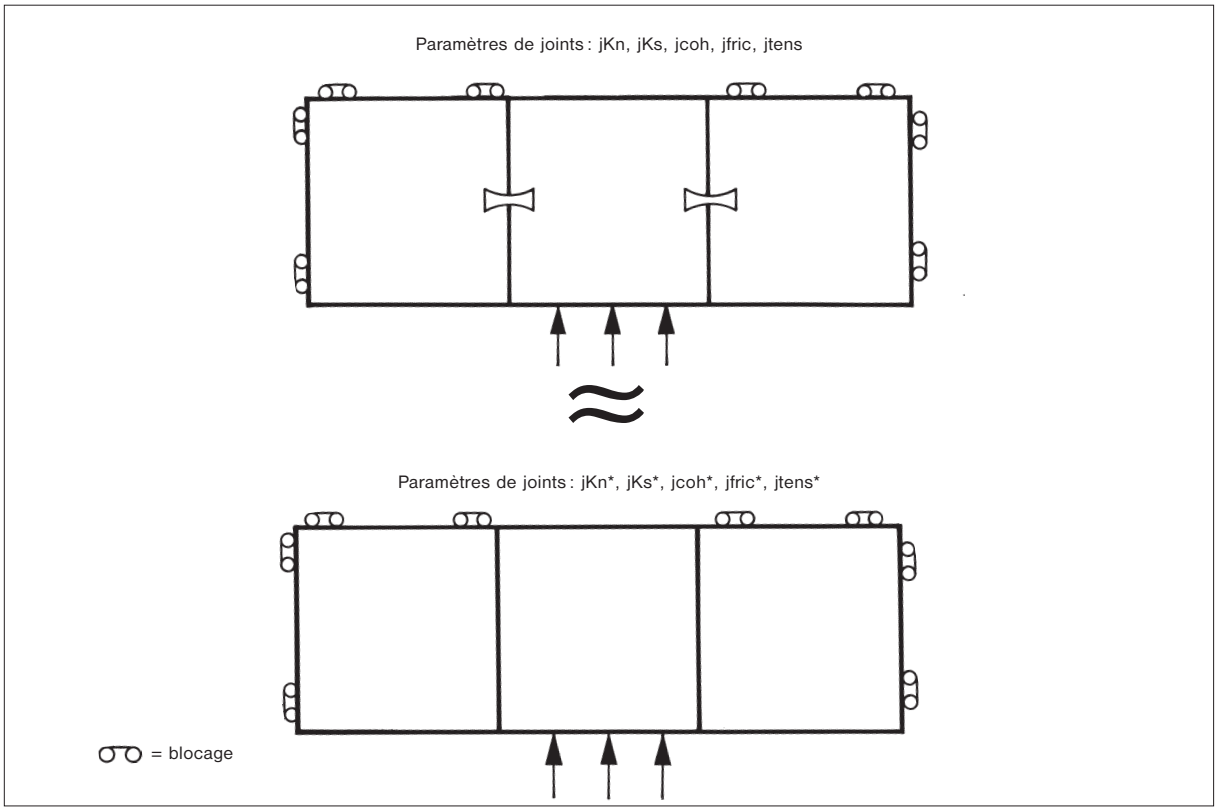


Fig. 7. Recherche d'un modèle équivalent de joint (dessin Nicolas Nilsson, Mohamed Aboul Amayem).

Étude comparée de la résistance aux mouvements de terrain entre les articulations des temples de Dendera et d'Edfou

L'analyse archéologique entreprise sur la construction du temple d'Hathor de Dendera a mis en évidence l'apparition de systèmes structurels articulés au niveau de l'appui d'éléments porteurs horizontaux et de la liaison entre le pronaos et le naos. La finalité de ce second dispositif était de dissocier les charges de l'extension du pronaos en fondations propres de celles descendant sur la construction initiale afin d'éviter les dégradations conséquentes à un tassement différentiel [16] [fig. 8 et 9]. L'articulation ouest montre clairement qu'elle a subi un tassement dont les conséquences n'ont pas altéré l'aspect formel du temple et son intégrité structurelle. Le temple d'Horus d'Edfou, dont l'édification a précédé celle de Hathor à Dendera, présente une juxtaposition similaire tant d'un point de vue spatial que chronologique entre le naos et le pronaos, mais sans détails d'articulation. Dans le cas du temple d'Edfou, qui a connu un phénomène identique de tassement différentiel, on constate que la maçonnerie nouvelle s'est écartée de l'ancienne de plusieurs centimètres et qu'une fissure s'est ouverte dans l'appareillage reposant à l'aplomb du contact entre les deux phases de construction.

Notre souci fut de comparer le comportement global de ces deux structures au moyen de modélisations numériques. Ainsi, nous avons plus particulièrement étudié l'effet de mouvements relatifs du sol consécutifs à l'édification des pronaos des temples d'Hathor et d'Horus [fig. 10].

L'absence d'informations précises sur les caractéristiques mécaniques du sol et des matériaux de construction à Edfou et à Dendera rend impossible une analyse quantitative fidèle. C'est pourquoi nous avons choisi de privilégier une approche qualitative comparée. Pour modéliser les fondations des temples, nous nous sommes référés aux observations sur le terrain [17]. Ces observations montrent l'existence d'un caisson en brique qui contient un lit de sable sur lequel reposent les assises de fondation en grès bien appareillées. Or, notre propos étant de comparer des tassements différentiels pour lesquels le dispositif de caisson de fondation n'intervient pas, à priori, nous avons seulement retenu, pour cette analyse, les informations concernant les assises de fondation en grès. D'autre part, pour que les résultats soient aisés à interpréter, nous avons délibérément choisi d'exagérer les déplacements en fixant la fondation du naos et en laissant la nouvelle construction du pronaos libre de se déplacer sous l'effet d'un tassement du sol sous-jacent. Cette façon de procéder, qui a tendance à accentuer l'amplitude des tassements relatifs, est justifiée car notre propos est d'analyser qualitativement les déplacements relatifs, d'une partie par rapport à l'autre.

Il était nécessaire de modéliser la maçonnerie avec précision afin de faire le diagnostic des perturbations structurelles consécutives aux tassements dans chacune des structures. Pour cela, nous avons tenu compte des crampons en appliquant les résultats de l'analyse

16 Voir pour la description de ce dispositif, P. ZIGNANI, *op. cit.*, p. 481-487 et plus particulièrement la fig. 32.
17 *Ibid,* p. 454-460.

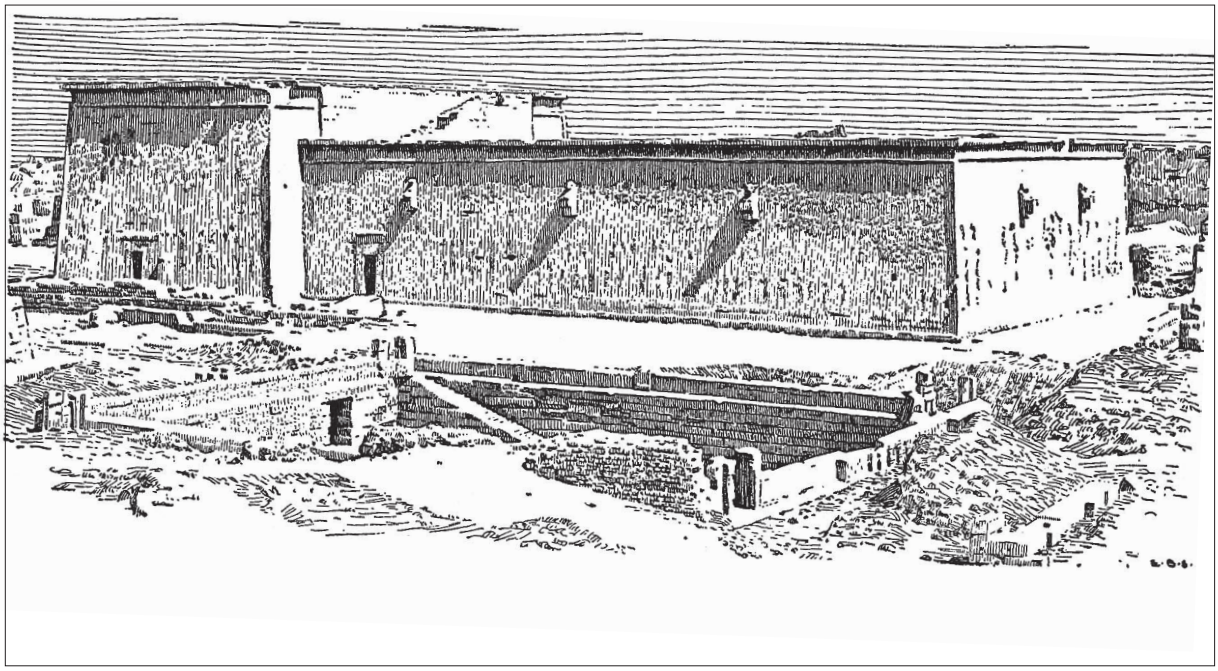


Fig. 8. Articulation du pronaos (seconde phase) et du naos (première phase) ; d'après E. B. Smith, *Egyptian Architecture as Cultural Expression*, New York, 1968, pl. 59/1.

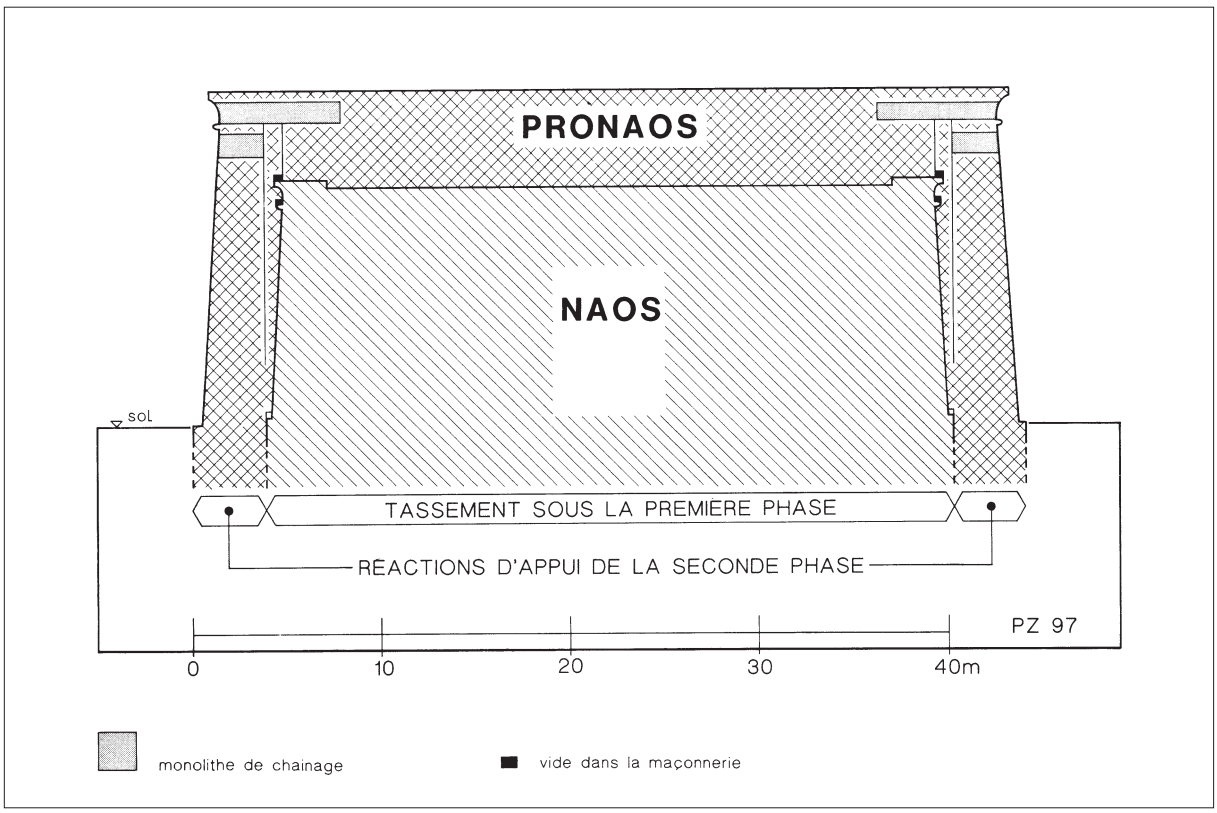


Fig. 9. Dendera, temple d'Hathor. Schéma de la distribution des charges au sol au niveau de la liaison naos/pronaos.

préliminaire des joints de maçonnerie, et nous avons essayé de représenter de façon relativement fidèle les blocs de maçonnerie de chacun des temples, sans pour autant chercher la concordance absolue [18].

Les résultats de l'analyse sont présentés sur la figure 10 qui schématise également le mode opératoire du calcul [19]. La structure de type Dendera subit un déplacement vertical de l'ensemble de la maçonnerie dont les blocs restent solidaires, alors que la structure de type Edfou accuse une composante de déplacement horizontale issue d'un léger mouvement de rotation autour du bloc grisé sur la figure. En conséquence, la maçonnerie subit un cisaillement horizontal le long de deux plans et se désolidarise dans la partie située au-dessus de la corniche du naos, en suivant un schéma en escalier. D'autre part, une analyse plus détaillée montre que les blocs de maçonnerie qui longent l'ancienne façade s'écartent, induisant une ouverture du contact entre les deux parties du temple. Cette ouverture ainsi que la dislocation de la maçonnerie en escalier, rendus par la modélisation, correspondent bien aux désordres observables au temple d'Horus à Edfou [fig. 11]. Le temple d'Hathor ne présente pas de perturbation structurelle aussi importante. Un décalage horizontal d'environ 1 cm est perceptible à l'est à travers une inspection rapprochée de l'épigraphie qui témoigne bien d'un déplacement vertical de la maçonnerie en fondation nouvelle selon la ligne de joint prévue dans l'articulation.

Les informations sur les caractéristiques mécaniques du sol et des matériaux de construction, indispensables pour une modélisation plus fidèle du temple, pourraient être obtenues par des sondages et des forages dans le sol et les fondations. Parallèlement, pour compléter notre connaissance sur le rôle mécanique de chaque élément, il serait utile d'effectuer des analyses physiques et mécaniques des mortiers de construction ainsi que des crampons en place.

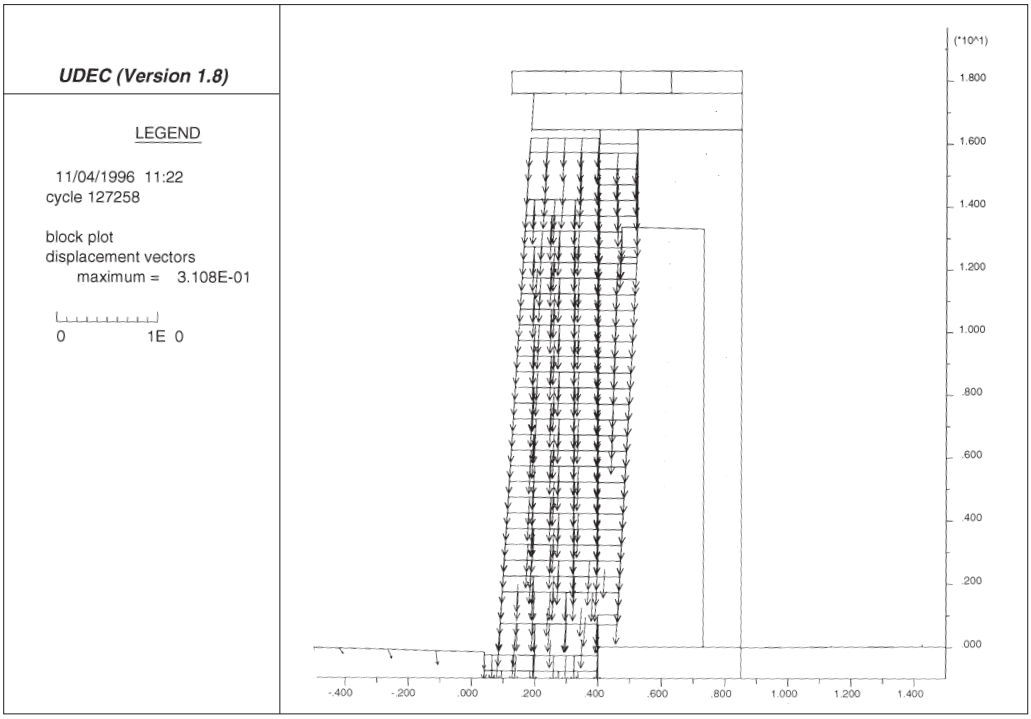
Tous ces éléments réunis, une simulation en trois dimensions donnerait des résultats très précis pour la connaissance des choix structuraux des bâtisseurs du temple d'Hathor à Dendera.

L'étude géotechnique par modélisation numérique, telle qu'elle a été menée en deux dimensions, a déjà permis de comprendre qualitativement les mécanismes d'altérations structurelles qui touchent, à des degrés différents, les temples d'Hathor et d'Horus. En cela elle confirme les conclusions de l'analyse archéologique sur la performance d'une solution technique témoignant de l'esprit fondamentalement innovant des concepteurs à la fin de la période ptolémaïque, capables d'introduire des systèmes d'articulation afin de gérer principalement les mouvements structurels en réaction aux mouvements du sol. La finalité de ces nouveaux dispositifs était d'assurer à la construction une plus grande résistance dans le temps. Cette logique va bien au-delà de la simple recherche du monolithisme de la maçonnerie que les générations précédentes de bâtisseurs avaient développée.

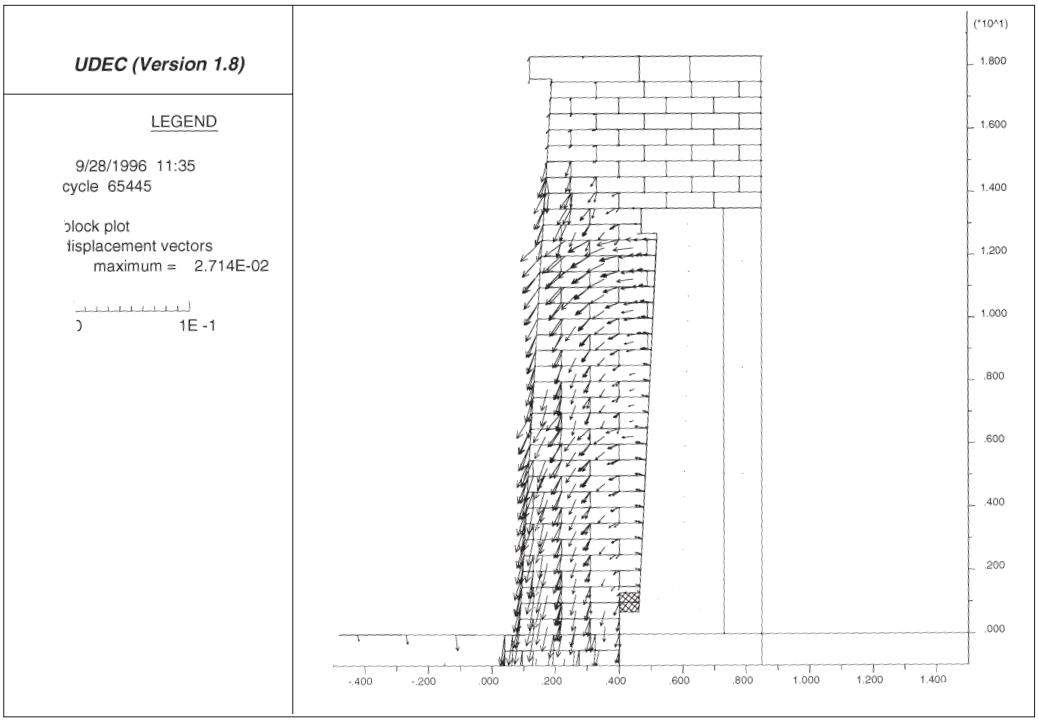
18 La complexité de la structure entravait une analyse en trois dimensions. Avec les moyens que nous avions à disposition, nous avons simplifié l'étude à une configuration en deux dimensions, si bien qu'il devint superflu de chercher une trop grande fidélité dans la géométrie du modèle.

19 Les flèches représentent les déplacements de chacun des blocs de maçonnerie sous l'effet du tassement différentiel.

Fig. 10. Déplacements induits par des tassements différentiels dans les structures étudiées des temples d'Edfou et de Dendera (modélisation Nicolas Nilsson, ECAE).



Structure de type Dendera



Structure de type Edfou

Fig. 11. Edfou, temple d'Horus. Altération du contact est naos/pronaos : la maçonnerie du pronaos s'écarte de plusieurs centimètres de celle du naos avec pour conséquence la fissuration de la corniche à l'aplomb.

Une technologie induite par l'idéologie

Les progrès et innovations techniques élaborés sur les structures cultuelles de la Basse Époque, et tout particulièrement ceux constatés à Dendera, ont amené leurs constructeurs à répondre bien mieux que par le passé aux qualités de durabilité, donc d'éternité, contenues dans le concept même du temple. Du point de vue des techniques de construction, on est obligé de constater que l'art de bâtir des anciens Égyptiens n'a jamais été aussi perfectionné qu'à ce moment. Les premières observations sur les espaces du temple d'Hathor, faites au cours de l'entreprise de relevé du monument, témoignent également d'une grande précision et d'une grande rigueur quant au positionnement et à la composition spatiale [20]. Nous avons à ce propos remarqué que les éléments d'architecture étaient implantés selon des grilles régulières [21] dont certains axes conservés sont, quel que soit le niveau, rigoureusement orthogonaux ou parallèles à l'axe longitudinal du temple [22]. Ces différentes grilles d'implantations et le « formalisme » exprimé dans le plan nous donnent l'impression que la conception spatiale avait atteint un degré de programmation allant bien au-delà des représentations en plan connues [23].

Ce premier constat pose la question des facteurs qui ont déterminé ce mouvement d'optimisation des techniques constructives, qui va de pair avec une plus grande pureté formelle de la composition spatiale. À la période ptolémaïque, l'ampleur et la progression dans le temps des perfectionnements apportés à la structure architectonique dénotent une réflexion à l'échelle du monument cultuel qui exclut l'idée d'une simple importation extérieure [24]. Il devient tentant de vouloir replacer cette évolution technologique dans l'environnement historique.

Dans le monde troublé de la période lagide, il semble que le temple soit devenu le lieu dépositaire de la civilisation pharaonique [25] avec pour conséquence le développement de son programme sous la forme d'une structure cultuelle « canonique » [26]. D'après J. Assmann, ce changement, encouragé par le sentiment de xénophobie de la société face à la domination étrangère (déjà sous les Perses puis sous les Macédoniens) serait allé jusqu'à accentuer, d'un point de vue typologique, l'organisation du temple en zones concentriques depuis le sanctuaire comme autant d'enceintes protectrices [27]. Dans une telle conjoncture, le temple tendrait au-delà de sa fonction cultuelle et cosmique à devenir en quelque sorte un « espace-manifeste » de la culture pharaonique.

20 Voir, pour illustrer la plus grande rigueur de la composition spatiale, l'exemple des cryptes de mur et de l'escalier longitudinal de Dendera par rapport à Edfou : P. Zignani, *op. cit.*, p. 464-468 et n. 35.

21 Ces grilles ont comme valeur d'entre-axe un multiple de la valeur moyenne de coudée de 0,534 m établie sur le naos en confrontant les mesures réelles avec celles inscrites dans les textes dédicatoires, voir S. Cauville, « Les inscriptions dédicatoires du temple d'Hathor à Dendera », *BIFAO* 90, 1990, p. 110 sq.

22 Quand il nous a été possible de vérifier la précision des bâtisseurs dans des situations de superposition d'axes ou de parallélisme à des niveaux différents nous avons toujours trouvé une valeur proche de la valeur d'origine dont la différence inférieure au cm (+/- 5 mm) correspond à la marge d'imprécision de notre méthode de relevé.

23 D. Arnold, *Building in Egypt*, New York, 1991, p. 7-10.

24 Nous avons vu par ailleurs (note 4) que le souci d'amélioration des qualités structurelles de la construction en pierre remontait bien au-delà de la période ptolémaïque.

25 Cl. Préaux, « Les Égyptiens dans la civilisation hellénistique d'Égypte », *CdE* 18, 1943, p. 156.

26 J. Assmann,« Der Tempel der ägyptischen Spätzeit als Kanonisierung kultureller Identität », dans J. Osing, E. K. Nielsen (éd.), *The Heritage of Ancient Egypt. Studies in Honour of Erik Iversen*, Copenhague, 1992, p. 11 sq.

27 *Ibid.* ; voir aussi J. Assmann, « Le temple égyptien et la distinction entre le dedans et le dehors », *Le temple lieu de conflit, Cahiers du CEPOA* 7, Louvain, 1994.

En suivant cette analyse historique, il devient plausible que le haut degré de systématisation atteint par le temple égyptien à la Basse Époque [28], surtout sous l'aspect de conservatoire, refuge de la culture égyptienne en réaction à un pouvoir civil exogène, ait stimulé chez ses concepteurs une réflexion sur les techniques de construction. Cette recherche technologique a permis à ces réalisations de répondre encore mieux au « cahier des charges » *d'un travail excellent pour l'éternité* [29] qui exigeait avant tout de la structure qu'elle soit parfaite et durable éternellement. Cette exigence est indissociable de la dimension cosmique du temple, que ne manquent pas de nous rappeler les textes :

« *Tant que le ciel sera établi sur ses quatre supports, que la terre sera stable sur ses fondements, tant que Rê brillera le jour, que la Lune luira la nuit, tant que Orion sera le Ba d'Osiris et que Sothis sera la souveraine des étoiles, tant que l'inondation viendra en son temps et que la terre cultivable produira ses plantes, tant que le Vent du nord sortira en son temps et que la flamme dévorera ce qui existe, tant que les décans feront leur service et que les étoiles resteront à leur place, le temple d'Haroëris à la tête, les deux Oudjats, le dieu grand, seigneur d'Ombos, de Sobek, d'Hathor, de Tasentnefert, de Panebtaoui, de Chonsou durera, stable comme le ciel, établi comme le château du lion, fort comme Thèbes, saint comme Héliopolis, stable comme Memphis, sans fin comme Rê éternellement.* » [30]

L'art de bâtir pour les dieux aurait pris de ce fait une valeur telle que certaines étapes de construction méritèrent d'être consignées en relief sur les murs et furent intégrées dans le cérémoniel de fondation de tradition millénaire [31]. La richesse de l'iconographie de ce rituel à période gréco-romaine apporte incontestablement une information, condensée en une série de gestes emblématiques, sur le déroulement du chantier [32]. Dans le répertoire de dix scènes établi par P. Montet on peut différencier les actions conduites par le pharaon selon leur contenu purement protocolaire (scènes I, II, IX et X) de celles référant à une opération concrète de chantier (scènes III à VIII). De ces six scènes classées dans l'ordre de déroulement de l'ouvrage, la scène III (« tendre le cordeau ») évoque l'acte d'orientation du temple à construire, les suivantes IV, V et VI, (« piocher la terre » ; « mouler la/les briques » ; « verser du sable ») font part du travail de préparation du terrain pour les fondations, la VII (« offrande des plaquettes ») illustre la mise en place des dépôts de fondations et la VIII (« pose des blocs ») décrit le travail de maçonnerie.

La préparation de la fondation représente ainsi la moitié des thèmes iconographiques en référence à l'activité de chantier. De ce rapport, il est tentant d'induire que les fondations étaient considérées, au moment de la conception de ces scènes, comme un aspect essentiel

28 J. BAINES, « Temple Symbolism », *RAIN* 15, 1976, p. 10.

29 Inscription dédicatoire du naos du temple d'Hathor à Dendera : S. CAUVILLE, *op. cit.*, p. 95.

30 A. GUTBUB, *Textes fondamentaux de la théologie de Kom Ombo*, *BdE* 47/1, 1973, p. 32 sq.

31 Un jambage de porte découvert à Hiéraconpolis atteste l'existence de telles cérémonies à la IIe dynastie (R. ENGELBACH, « A Foundation Scene of the Second Dynasty », *JEA* 20, 1934, p. 183 sq. et pl. 24. Pour des exemples plus récents (XVIIIe dynastie) voir P. BARGUET, « Le rituel archaïque de fondation des temples de Medinet-Habou et Louxor », *RdE* 9, 1952, p. 1-22.

32 P. MONTET, « Le rituel de fondation des temples égyptiens », *Kêmi* 17, 1964, p. 74 sq. et 99 sq.

de la construction. Cette impression est renforcée par les scènes qui précèdent et qui suivent immédiatement celles qui illustrent l'activité de fondation où l'ouvrage des substructions est encore évoqué comme garantie de pérennité. Dans l'acte de tendre le cordeau, le pharaon offre déjà le temple « établi sur sa fondation » dont les qualités de perfection de l'ouvrage doivent assurer l'existence « en ignorant la destruction sur terre éternellement [33] ». Quant aux dépôts d'offrandes, les textes annoncent que pharaon les a préparés « aux quatre angles [du] temple pour parachever [le] travail pour l'éternité [34] ».

Dans les opérations qui s'enchaînent au niveau de la préparation des fondations, la finalité de durabilité est fréquemment associée à des actes inscrivant la construction dans l'univers cosmique du temple. L'action de creuser la fosse de fondation jusqu'à la limite de la nappe phréatique prend ici une forte dimension emblématique en rattachant le temple au mythe de la création du monde : « J'ai défoncé pour toi la terre jusqu'à la limite du Noun pour parachever ton travail pour l'éternité [35] ». En revanche, quand le rituel désigne la fouille comme l'action de « creuser un trou jusqu'au niveau de l'eau pour que soit solide ta maison, pour [achever ?] son travail jusqu'à la limite de l'horizon » il est crédible de reconnaître dans cet acte la préoccupation élémentaire de protéger les substructures en restant au-dessus du niveau de l'eau et d'établir un niveau horizontal de référence [36]. Concernant la scène de mouler la/les briques, on peut suggérer d'étendre l'interprétation de J.-Cl. Goyon qui propose que le cérémoniel de fondation soit axé sur le mystère de la naissance d'un être vivant sur les briques d'accouchement [37], aux murs caissons qui se développent comme phase constructive au moins depuis la XXXe dynastie. Dans cette configuration, les briques forment une structure préalable, « reposoir » [38] ou matrice au sens de la terminologie *mshnt*, destinée à permettre l'assise de la maçonnerie du temple.

L'archéologie a montré que ce caisson de briques contenait un épais lit de sable du gebel que l'on peut mettre en rapport avec la scène VI. De nouveau les textes évoquent, avec cette opération, un souci de parfaire la préparation du sol des substructions afin de « fortifier le travail dans la grande place » et d'assurer un « niveau pour supprimer sa destruction [39] ». Cette configuration tardive avec un caisson offre un sol homogène qui permettait un calage parfait, tant géométrique que statique, de la première assise de construction. Elle a perfectionné un usage qui apparaît dès l'Ancien Empire [40] dans lequel on a cru reconnaître, au-delà d'une qualité constructive, la volonté de fonder le temple sur un matériau pur [41]. À l'échelle de l'édification du temple, il est à noter que l'ouvrage de la maçonnerie qui devait requérir le plus grand effort n'est représenté que par une scène (VIII) alléguant un « travail parfait d'éternité » en pierre.

33 *Ibid.*, p. 79, 82, 83.
34 *Ibid.*, p. 91 sq.
35 *Ibid.*, p. 85 sq.
36 P. Zignani, *op. cit.*, p. 454.
37 J.-Cl. Goyon, *BiOr* 40, 1983, p. 353 (recension de la thèse de doctorat inédite de S. Abd el-Azim el-Adly soutenue à Tübingen en 1981 : *Das Gründungs- und Weiheritual des ägyptischen Tempels von der frühgeschichtlichen Zeit bis zum Ende des Neuen Reiches)*.
38 Voir É. Chassinat, *Edfou* III, Le Caire, 1928, p. 114 et *Edfou* VII, Le Caire, 1932, p. 48.
39 P. Montet, *op. cit.*, p. 89 sq.
40 D. Arnold, *op. cit.*, p. 110.
41 H. Ricke, « Der "Hohe Sand" in Heliopolis », *ZÄS* 71, p. 109 sq.

Face à cette imbrication des niveaux d'interprétation technique et symbolique (des gestes liés à une pratique de chantier sont ici associés à la formulation d'un travail parfait d'éternité), on peut se demander si le contenu du rituel de fondation de la période gréco-romaine n'intègre pas dans le cérémoniel une recherche de durabilité pour préserver l'intégrité physique de la structure cultuelle.

À travers le travail de relevé et d'étude architecturale en cours au temple d'Hathor à Dendera, l'étude des détails techniques manifeste une avancée technologique inégalée, fruit d'une longue réflexion sur l'art de construire, dont la pertinence des solutions est confirmée par l'étude sur modèle qu'il a été possible de mener. Il semble que ce développement ait eu lieu en parallèle avec une évolution vers une plus grande précision de la composition spatiale et l'adoption d'un plan où prévaut un agencement plus concentrique des espaces autour du sanctuaire [42]. Ces premières observations dessinent une recherche évidente de perfection sur les différents aspects liés à la conception de la structure architecturale du temple à la Basse Époque.

Le niveau de systématisation atteint sur le temple d'Hathor s'inscrit à la fin de cette évolution par le simple fait que l'on a sur ce site un projet qui appartient aux dernières grandes réalisations architecturales égyptiennes. Le processus évolutif de l'amélioration des détails constructifs et la référence inscrite sur ses murs à un programme cultuel remontant aux temps mythiques des « serviteurs d'Horus » [43] nous montre bien l'ancrage profond de la conception architecturale du temple d'Hathor dans la culture pharaonique.

42 J. Assmann, « Le temple égyptien », *op. cit.*, p. 23 sq.

43 Fr. Daumas, « Le trône d'une statuette de Pepi Ier trouvé à Dendera », *BIFAO* 52, 1953, p. 169 sq. Cette référence fait remonter la découverte de ce programme à la période de Pépi Ier dans la salle des archives du palais royal à Memphis et elle annonce que le recours à cette documentation s'est perpétué à travers les temps en mentionnant notamment Thoutmosis III.