

Etude de l'évidement du IX^e pylône du temple de Karnak par la méthode des éléments distincts — Recherche d'une méthodologie

The excavation of the IXth pylon in Karnak temple
studied by the distinct
element method — Research for a methodology

T. VERDEL, J.P. PIGUET

Laboratoire de Mécanique des Terrains, Ecole des Mines de Nancy*
Ineris**

H. HELAL, T. ABDALLAH

Cairo University***

Rev. Franç. Géotech. n° 65, pp. 57-66 (octobre 1993)

Résumé

Avec les nouvelles méthodes de modélisation numérique par éléments distincts, il devient possible d'étudier la stabilité d'un assemblage de blocs tel que celui du môle est du IX^e pylône du temple de Karnak et, a fortiori, le problème de son évidement que souhaitent réaliser les archéologues. En premier lieu, une méthode d'ajustement des données a été développée dans le but d'optimiser la comparaison des différents processus d'évidement qui ont été étudiés. Ces processus d'évidement ont été modélisés afin de sélectionner celui qui engendre les plus faibles perturbations aux parements de la structure qui, elle, doit rester en place. D'autre part, ayant choisi ainsi la méthode d'évidement, l'étude de la stabilité du pylône a été approfondie de façon à identifier les mécanismes d'instabilité qui pourraient être rencontrés lors de l'évidement et les mesures de surveillance ou de soutènement à mettre en place si cela s'avérait nécessaire.

Abstract

With the new numerical distinct elements method, it is now possible to study the stability of a structure composed of blocks as the IXth pylon of Karnak temple and consequently to study the problem of its excavation, on a computer. First, a methodology for adjusting the input data was developed in order to optimize the calculations, then, different excavation processes were simulated in order to determine the one which produces the minimum disturbance on both sides of the pylon. Then, the best process being chosen, further calculations provided informations about the weak points of the structure and helped us in suggesting a monitoring and/or a supporting system to install before or during the excavation.

* Parc de Saurupt, 54042 Nancy Cedex.

** Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Parc Technologique Alata, BP n° 2, 60550 Verneuil-en-Halatte.

*** Engineering Center for Archaeology, Faculty of Engineering, Cairo University, Giza, Egypt.

1. INTRODUCTION

Le IX^e pylône du Temple de Karnak en Egypte est un portail de pierres constitué de deux mâles en vis-à-vis. Il fut édifié sous le règne de Horemheb, au cours de la XVIII^e dynastie, à Louxor. C'est une structure colossale d'une longueur à la base d'environ 65 m, d'une hauteur originelle d'environ 31,5 m dont 5 m en fondations et d'une épaisseur de 12,5 m au niveau du sol et 4 m au sommet (fig. 1). Il représentait, à l'origine, un volume total (fondations comprises) d'environ 17 000 m³ soit une masse approximative de 30 600 tonnes dont 25 % en fondations (ces valeurs sont des estimations).

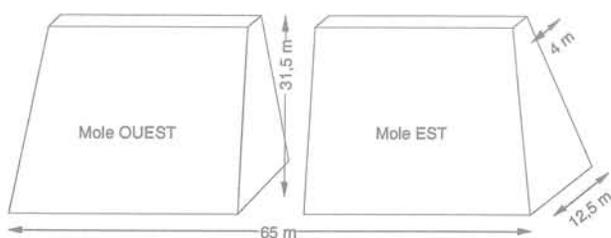


Fig. 1. — Représentation schématique du Pylône.
Fig. 1. — Schematic representation of the Pylon.

Le mâle ouest du IX^e pylône est en cours de reconstruction après un démontage fastidieux et long, de 1964 à 1981 (MARTINET, 1992), qui fut nécessaire pour sa restauration mais aussi pour extraire les milliers de petits blocs ou « talatats » dont le cœur était rempli. En effet, ces talatats, couverts d'inscriptions, proviennent d'autres temples que les archéologues cherchent à reconstituer en partie (à l'origine, ces talatats étaient au nombre de 230 000 environ, à l'intérieur de l'ensemble du IX^e pylône).

Pour le mâle est, il est peut être possible de le vider de ses talatats sans en démonter les parements. En effet, la hauteur restante de cette partie du pylône (fig. 2) rend a priori une telle opération envisageable. L'objet de l'étude décrite dans ces pages consiste donc à modéliser le mâle est du IX^e pylône par une méthode numérique, de façon à sélectionner le meilleur processus d'évidement et à mesurer les risques qui pourraient être encourus pendant cette opération.



Fig. 2. — Môle est du IX^e Pylône (Centre franco-égyptien de Karnak).

Fig. 2. — Est part of the IXth Pylon.

2. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

L'incertitude qui pèse sur les valeurs de certains paramètres introduits dans les modèles numériques, est propre aux Sciences de la Terre (HART, 1990). Elle est particulièrement importante dans le cas d'un monument historique égyptien où il est rarement facile de réaliser des sondages ou des mesures in situ, susceptibles d'endommager le dit-monument. Pour ces raisons, l'étude présentée ici revêt avant tout un caractère phénoménologique. Ce caractère est d'autant plus marqué que le milieu étudié est discontinu, en l'occurrence formé de blocs superposés, et que la méconnaissance des interactions entre ces blocs est un handicap notoire. Dans un tel cas, le but de la modélisation est avant tout d'améliorer la compréhension des phénomènes susceptibles de se produire, d'anticiper certains problèmes en identifiant les mécanismes pouvant conduire à des états de déformation ou de charges inacceptables pour la structure étudiée (HART, 1990; STARFIELD et CUNDALL, 1988). C'est dans ce contexte que se déroulent les différentes étapes du travail présenté ici.

En ce qui nous concerne particulièrement, le problème posé consiste à définir la meilleure technique d'évidement du mâle est du IX^e pylône afin d'éviter le démontage des blocs de parements qui est un travail long et délicat.

Dans le cas d'un monument tel que le IX^e pylône de Karnak, on dispose de peu de données. La géométrie des parements est connue avec une grande précision (photogrammétrie) mais celle de l'empilement des talatats est par contre beaucoup plus incertaine. Le niveau des fondations est à peu près identifié. Quant aux caractéristiques mécaniques des blocs, on ne connaît que celles du grès des parements, déterminées en laboratoire (MARTINET, 1992). On ne connaît rien, a priori, des caractéristiques des joints ainsi que de l'état de dégradation des blocs de parement ou des talatats.

Compte tenu de cette méconnaissance des données, il faut, dans un premier temps, faire des choix de valeurs (notamment pour les caractéristiques mécaniques des matériaux et des joints) qui soient assez réalistes et qui, d'autre part, permettent d'optimiser la modélisation par leur pouvoir discriminant. Ayant ainsi « ajusté » ces données à l'aide de différents jeux d'essais, nous avons ensuite simulé numériquement plusieurs processus d'évidement et les avons comparés entre eux afin de sélectionner celui qui minimise les perturbations théoriques causées aux parements. Enfin, ayant choisi la meilleure méthode d'évidement a priori, nous nous sommes placés dans des conditions défavorables du point de vue de la stabilité (blocs de parements très fissurés, en mauvais état de conservation, joints lisses, etc.) afin de localiser les endroits à renforcer, au cours du processus d'évidement choisi précédemment. La figure 3 résume brièvement la méthodologie adoptée ici.

3. LA MÉTHODE DE CALCUL

La méthode de calcul retenue pour cette étude est celle des éléments distincts dont procède le logiciel utilisé ici, UDEC (Universal Distinct Element Code), qui permet

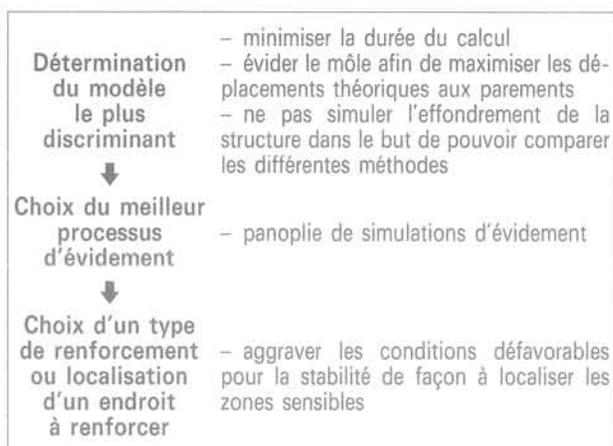


Fig. 3. — Méthodologie retenue pour l'étude.

Fig. 3. — Methodology for the study.

le calcul des déplacements et des rotations de chacun des blocs constituant un milieu discontinu. Elle autorise d'autre part le détachement complet d'un bloc de même qu'elle reconnaît les nouveaux contacts susceptibles de s'établir entre blocs, au fur et à mesure du déroulement du calcul. Elle repose sur une résolution de type explicite où les équations de mouvement sont directement résolues pour chaque point nodal en fonction de la variable « temps ». Les corps (ou blocs) modélisés peuvent, par ailleurs, être rigides ou déformables (HART, 1990). Cette méthode semble donc convenir à l'étude du IX^e pylône en tant qu'assemblage de blocs reposant les uns sur les autres.

Ce code de calcul traite des problèmes bidimensionnels, c'est pourquoi on ne peut l'utiliser ici que sur une section du pylône qui se reproduit sur une longueur supérieure d'environ 3 à 4 fois la plus grande dimension de cette section. Dans ce cas l'hypothèse des déformations planes est justifiée et le calcul peut être mené en deux dimensions. Dans le cas présent, les résultats du calcul ne sont donc valables que suffisamment loin des bords de la structure, c'est-à-dire dans la partie centrale du môle.

D'autre part, dans un tel calcul, les blocs sont supposés être aussi longs que la structure, ce qui doit tempérer l'analyse des résultats. Néanmoins, étant donnée la géométrie ainsi retenue, il semble possible d'interpréter les résultats et de simuler certains phénomènes qui pourraient être rencontrés lors de l'évidement du môle.

4. LES DONNÉES INITIALES

Parmi les données disponibles, on trouve la géométrie des parements dont la figure 2 montre un aspect.

Pour réaliser un calcul en 2 dimensions comme l'exige UDEC, il faut choisir une section suffisamment reproductible tout au long de la structure. La partie haute (est) du môle a donc été ignorée et une section transversale dans la partie basse (centre et ouest) a été choisie (fig. 4). Les données proviennent de relevés réalisés

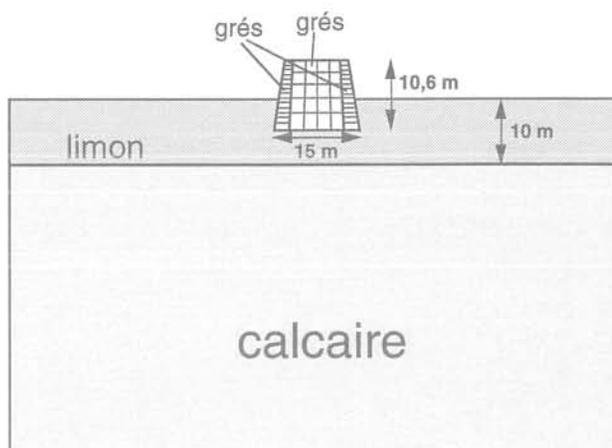


Fig. 4. — Coupe nord-sud modélisée.

Fig. 4. — Modelled north-south section.

par les membres de la mission archéologique franco-égyptienne d'étude des temples de Karnak.

Les caractéristiques mécaniques du milieu ne sont connues que pour le grès des parements. Mais il convenait de tenir compte de son état de dégradation (fissures nombreuses) avec le temps. En effet, comme le note déjà S. SAUNERON en 1968 à propos des pierres du pylône: «... le plus grand nombre [de ces pierres] avaient éclaté en lits horizontaux ou bien se fendillaient obliquement, sous l'effet des tensions internes et des écrasements entraînés par les tassements différentiels des fondations.» (SAUNERON, 1968). Le module d'élasticité du grès des parements a donc été arbitrairement divisé par 10 par rapport à la mesure en laboratoire obtenue sur un échantillon intact (MARTINET, 1992). Le tableau 1 rassemble l'ensemble des données mécaniques notamment recueillies dans la littérature pour les autres matériaux (HELAL *et al.*, 1991; COSTET et SANGLERAT, 1983). En ce qui concerne les talatats, en grès eux aussi, il leur a été attribué initialement les caractéristiques du parement. Leur nombre dans la section choisie pour le calcul est d'environ 1 000. La figure 4 associée au tableau 1 représente l'ensemble du modèle avec les caractéristiques mécaniques des différents matériaux.

D'autre part, 5 types de discontinuités existent dans le problème du IX^e pylône :

- les joints entre les blocs de parements ;
- les joints entre les talatats ;
- les interfaces entre talatats et blocs de parements ;
- les interfaces entre le pylône et le limon ;
- l'interface entre limon et soubassement calcaire.

Ces discontinuités doivent être caractérisées par les paramètres suivants :

- la raideur normale JKN (MPa/m) ;
- la raideur tangentielle JKS (MPa/m) ;
- la tangente de l'angle de friction JFRIC (sans unité) ;
- la cohésion JCOH (MPa).

Tableau 1. — Caractéristiques mécaniques des matériaux.

Matériau	D (kg/m ³) Masse volumique	E (MPa) Module d'élasticité	ν (-) Coefficient de Poisson	Rc (MPa) Résistance à la compression simple	Rt (MPa) Résistance à la traction	C (MPa) Cohésion	Φ (°) Angle de friction	Référence
Grès	1 800	2 000 (20 000/10)	0,22	19,9	2	—	—	Martinet, 1992
Calcaire	2 400	12 000	0,21	12,8	—	—	—	Helal et al., 1991
Limon	1 400	5	0,33	0,017	0	0,005	28	Costet et Sanglerat, 1983

Etant donné l'absence de tests de laboratoire ayant porté sur les interfaces des blocs du IX^e pylône, nous avons retenu, pour la phase préliminaire du calcul, des paramètres qui expriment l'impossibilité pour les différents blocs de s'interpénétrer (JKN élevé, de l'ordre de grandeur du module d'Young du matériau le plus rigide, soubassement calcaire exclu), la possibilité pour les joints d'être sujets à un comportement plastique et donc d'être cisailés (JKS plus faible et JFRIC très faible). JCOH a été choisi égal à 0 de façon à réduire le nombre de paramètres à faire varier. Les valeurs retenues pour JKS, JFRIC et JCOH (que l'on trouve dans le tableau 2) tendent à réduire, d'autre part, la stabilité des joints (entrée en plasticité des joints plus rapide) et donc, à se placer du côté de la sécurité.

5. RECHERCHE D'UN MODÈLE DISCRIMINANT

Rappelons que le but de l'étude est de trouver le processus d'évidement qui minimise les perturbations aux parements. Pour comparer les différentes simulations qui seront réalisées, ces perturbations doivent être significatives et ne pas conduire à un effondrement qui rendrait toute comparaison impossible.

Il nous faut donc, au préalable, déterminer un modèle de base, dont les paramètres permettent de différencier le plus possible les différentes simulations qui seront faites, à partir duquel ces simulations seront économes en temps de calcul (sinon de telles comparaisons seraient matériellement impossibles à réaliser) et qui conserve, malgré cela, un certain réalisme. Il s'agit donc de construire un modèle qui constitue un compromis entre le réalisme et la fonctionnalité et qui soit le plus discriminant possible vis-à-vis des simulations d'évidement.

5.1. Modification de la géométrie

Pour bâtir ce modèle, il a fallu d'abord modifier la géométrie initiale : le nombre de talatats dans la section étudiée a été ramené de 1 000 à 20 gros blocs occupant la même surface (fig. 5). Pour donner à cet ensemble de 20 blocs des propriétés de déformabilité

Tableau 2. — Caractéristiques mécaniques des joints.

JKN (MPa/m)	JKS (MPa/m)	JFRIC (-)	JCOH (MPa)
1 000	0,1	0,1	0

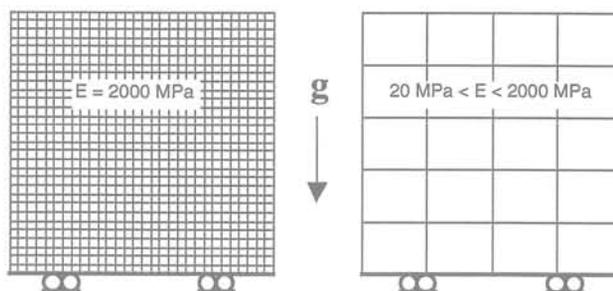


Fig. 5. — Recherche d'un remplissage de talatats équivalent.

Fig. 5. — Research for an equivalent talatats filling.

sensiblement équivalentes à un ensemble de 1 000 petits blocs, une étude paramétrique par simulation numérique a été menée à partir d'un assemblage simple de 1 000 blocs et d'un assemblage simple de 20 blocs sollicités par la pesanteur. Lors de cette étude préliminaire, seul le module de déformation a été changé pour donner à l'ensemble des 20 blocs une déformabilité sensiblement équivalente à l'assemblage de 1 000 blocs (les autres propriétés des talatats et de leurs joints indiquées au chapitre précédent ont été conservées). Il en a résulté qu'un module de déformation divisé par 10 par rapport à sa valeur initiale établit un compromis satisfaisant entre la déformation verticale et la déformation horizontale de l'assemblage de 20 blocs comparées à celles de l'assemblage de 1 000 talatats.

D'autre part, 20 blocs suffisent à rendre compte des processus d'évidement différents que nous nous sommes proposés d'étudier.

A ce stade, les modules de déformations prennent les valeurs du tableau 3.

Tableau 3. — Caractéristiques modifiées après simplification du remplissage.

	Parement	Remplissage
E (MPa)	2 000	200
JFRIC	0,1	0,1

5.2. Modification des caractéristiques mécaniques

Ensuite, une série de simulations d'un évidement total et instantané ont été modélisées. Pour chacune d'elles, les modules de déformation ainsi que l'angle de frottement des joints, pour les parements et les talatats, ont été de nouveau modifiés de façon à produire la plus grande perturbation possible du parement sans effondrement. Ceci représente l'étape principale de recherche du modèle le plus discriminant. La perturbation aux parements a été appréciée par le déplacement horizontal final du bloc supérieur du parement (H2 ou H3 sur la figure 6). Les résultats de ces simulations sont rassemblés dans le tableau 4.

Tableau 4. — Résultats des simulations d'ajustement des données.

Numéro de la simulation	Parement		Remplissage		Déplacement horizontal du bloc supérieur du parement
	JFRIC	E (MPa)	JFRIC	E (MPa)	
1	0,01	2 000	0,01	200	chute
2	0,01	2 000	0,05	200	chute
3	0,01	2 000	0,1	200	2,19 cm
4	0,01	200	0,01	2 000	chute
5	0,01	2 000	0,01	2 000	chute + très lent
6	0,01	400	0,01	2 000	chute + lent
7	0,1	200	0,01	2 000	1,23 cm
8	0,05	200	0,01	2 000	1,26 cm
9	0,05	200	0,01	200	1,27 cm
10	0,02	200	0,01	200	1,23 cm
11	0,02	200	0,01	200	1,2 cm
12	0,01	200	0,01	200	chute rapidement
13	0,015	200	0,01	200	1,23 cm
14	0,015	200	0,01	2 000	1,19 cm

Dans ce tableau, on observera que c'est la simulation numéro 3 qui fournit la perturbation maximale au parement sans effondrement. Ce sont donc les données

de cette simulation qui seront retenues pour la suite de l'étude. Seules les valeurs de friction de joints et de module d'élasticité des blocs de parements et de remplissage ont été ajustées ici car ce sont des paramètres qui peuvent présenter de grandes différences entre leur mesure en laboratoire sur quelques échantillons et leurs valeurs vraies in situ. Le tableau 5 rassemble donc les valeurs finalement retenues avant de modéliser et de comparer les différents processus d'évidement envisageables.

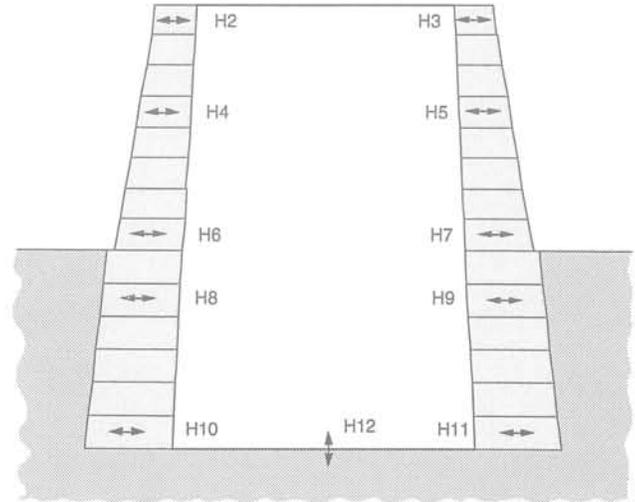


Fig. 6. — Localisation des points de suivi des parements. Fig. 6. — Points where displacement is observed.

Tableau 5. — Caractéristiques modifiées après ajustement des données.

	Parement	Remplissage
E (MPa)	2 000	200
JFRIC	0,01	0,1

6. CHOIX DU MEILLEUR PROCESSUS D'ÉVIDEMENT

La figure 7 représente les 10 façons d'évider le pylône qui ont été modélisées. Elles ont été proposées pour leur mise en pratique possible sur le terrain moyennant d'éventuels dispositifs de consolidation ou de soutènement (modèles 2, 3, 5, 7 ou 8 dont l'évidement, à caractère vertical, paraît difficile à réaliser). Pour chaque simulation, différentes étapes sont représentées. Elles correspondent à des phases d'évidement suivies d'une période de stabilisation (ou d'arrêt des travaux) destinée à minimiser les perturbations aux parements.

Au cours de chaque simulation, le déplacement horizontal du parement a été suivi en 10 points (H2 à H11) ainsi que le soulèvement du sol au pied du pylône (H12), figure 6.

Les résultats de chaque simulation ont été évalués par la racine carrée de la moyenne des carrés des ampli-

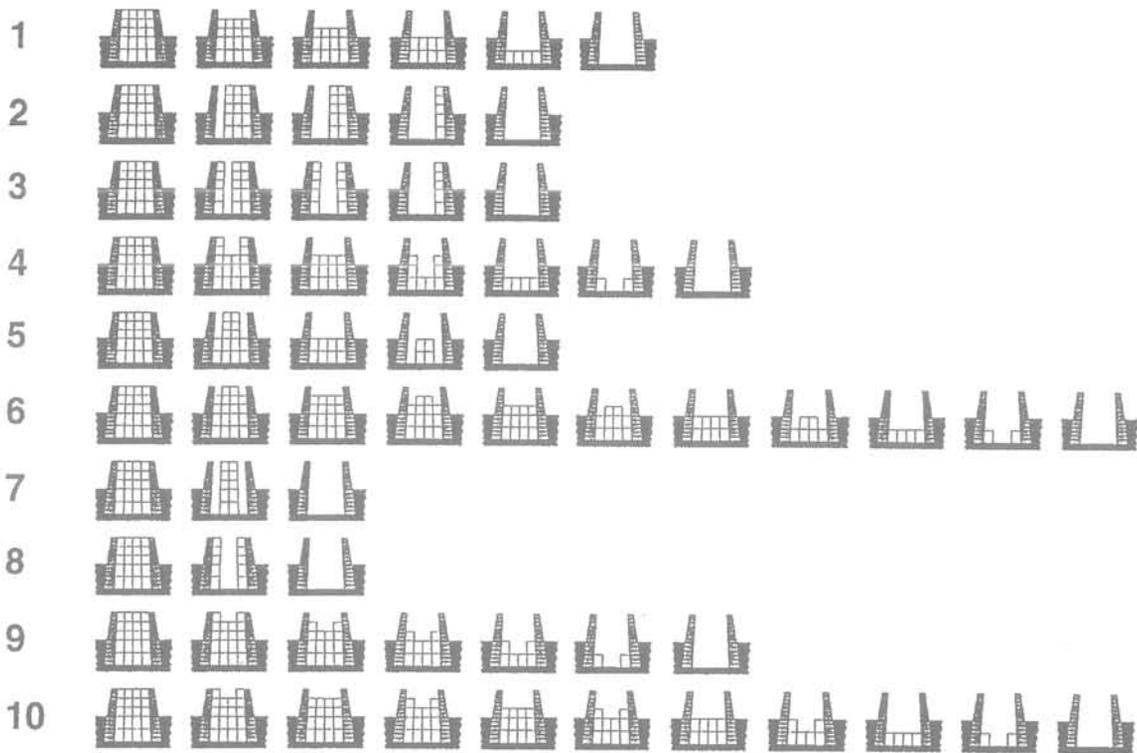


Fig. 7. — Les différentes simulations réalisées sur ordinateur.

Fig. 7. — The computed simulations.

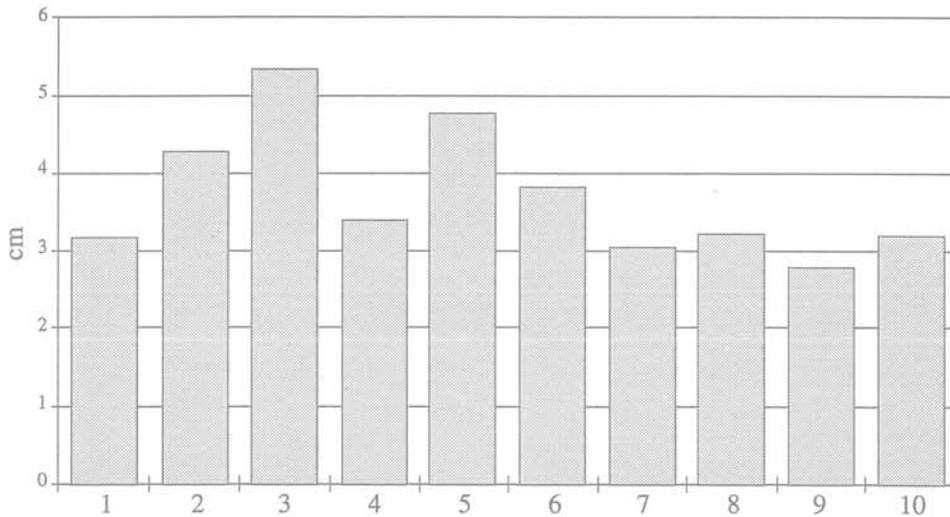


Fig. 8. — Déplacements aux parements pour l'ensemble des simulations.

Fig. 8. — Displacements at both sides, for all the models.

tudes maximales atteintes par les différents déplacements horizontaux au cours des étapes de l'évidement. Ils sont représentés sur la figure 8 dont la lecture indique une plus faible perturbation des parements pour le modèle 9.

D'une manière générale, les simulations représentant un évidement de type vertical (modèles 2, 3, 5, 7 et 8) engendrent une perturbation des parements plus importante qu'avec les autres simulations (fig. 8). Parmi

les autres simulations, les moins bons résultats obtenus par le modèle 6 semblent indiquer que l'évidement est meilleur quand il commence au centre du pylône plutôt que sur ses bords. Restent donc les modèles 1, 4, 9 et 10 pour lesquels les résultats ne diffèrent guère plus de 15 %.

Parmi ces modèles, le numéro 9 semble être celui qui fournit une perturbation minimale aux parements tant au niveau des déplacements absolus qu'au niveau des

déplacements relatifs entre blocs qui sont effectivement les plus faibles de la comparaison (aspect non illustré).

Au vu des simulations réalisées sur ordinateur avec le code UDEC, il semble donc que la meilleure manière d'évider le pylône consiste à commencer le déchargement du pylône par le milieu et de toujours faire en sorte que le milieu soit plus évidé que les bords, tout au long de l'opération (fig. 9), de façon à assurer un maintien latéral des parements pendant chaque phase d'évidement.

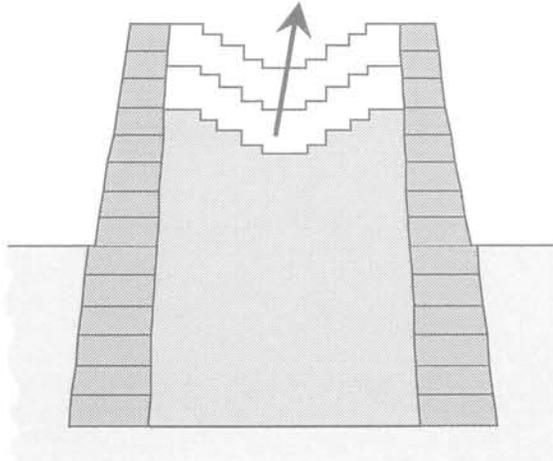


Fig. 9. — Meilleure méthode d'évidement obtenue par les simulations.

Fig. 9. — Best excavation method as obtained after simulations.

Néanmoins, la simplification trop grande des modèles pose quelques problèmes et l'on comprend mal pourquoi le modèle 10 par exemple qui reprend le schéma d'évidement du modèle 9 mais avec plus de précautions (plus d'étapes) donne des résultats moins bons. Le rôle stabilisateur joué par le déconfinement du sol, au cœur du pylône, pourrait être à l'origine de ces différences. Il pourrait également expliquer les différences obtenues entre les modèles 2 et 7 ou 3 et 8. On note, en effet, un soulèvement du sol à la base du pylône d'environ 14 cm au centre (le limon) tandis que les parements se soulèvent d'environ 5 cm à la fin de l'évidement. Il convient donc de tempérer l'interprétation des résultats, d'autant plus qu'entre les meilleurs modèles simulant un déchargement horizontal, la différence entre le modèle 9 et les autres (1, 4 et 10) varie de 9,5 à 13,3 % en moyenne générale, ce qui est assez peu eu égard aux hypothèses simplificatrices utilisées. La différence entre le modèle 9 et les modèles simulant un déchargement de type vertical (modèles 2, 3, 5, 7 et 8) est de 10,5 % pour le modèle 7 peu réalisable en pratique sans dispositif de soutènement et varie de 18,8 % (modèle 8) à 68,5 % (modèle 3), ce qui est nettement plus important.

D'autre part, la contrainte verticale au pied des parements passe d'environ 0,15 MPa avant l'évidement à 0,2 MPa après, soit une augmentation de 30 % due à la redistribution des contraintes.

Des contraintes de traction horizontales apparaissent par ailleurs dans le parement et notamment à leur base où

elles atteignent environ 0,07 MPa. Ce qui peut être à l'origine de ruptures localisées à cet endroit si la roche y est très dégradée (à noter que ce niveau des fondations est situé sous la nappe d'eau).

7. LOCALISATION DES ZONES D'INSTABILITÉ POTENTIELLE

Ayant ainsi déterminé le meilleur processus d'évidement du pylône a priori, il est possible de se pencher sur les types de désordres auxquels on peut s'attendre au moment de la réalisation de cet évidement dans le cas où la qualité des joints et des blocs serait plus médiocre que prévu. Pour cela, des simulations nouvelles ont été menées, avec des caractéristiques mécaniques légèrement modifiées, la méthode d'évidement restant celle du modèle 9.

De ces simulations supplémentaires, nous avons constaté que, globalement, les caractéristiques mécaniques retenues dans le modèle 9 sont les valeurs limites qui permettent au parement de rester en place dans son ensemble malgré des cisaillements significatifs aux joints des parements. En deçà de ces limites, deux phénomènes peuvent être constatés :

- soit les blocs des parements glissent dès le début de l'évidement, ce qui provoque leur chute. Dans ce cas illustré par la figure 10, la raison est à trouver dans la trop faible valeur de l'angle de frottement des joints du parement (joints « savons ») ;

- soit le parement garde une certaine cohésion d'ensemble et chute d'un seul tenant à la fin de l'évidement sous l'effet d'une trop grande déformation des blocs de parements les plus bas, soumis à plus forte charge. Ce cas qu'illustre la figure 11 apparaît notamment quand l'angle de frottement des joints du parement est augmenté (par rapport au modèle 9) et que le module d'élasticité du grès du parement est choisi 100 fois plus faible.

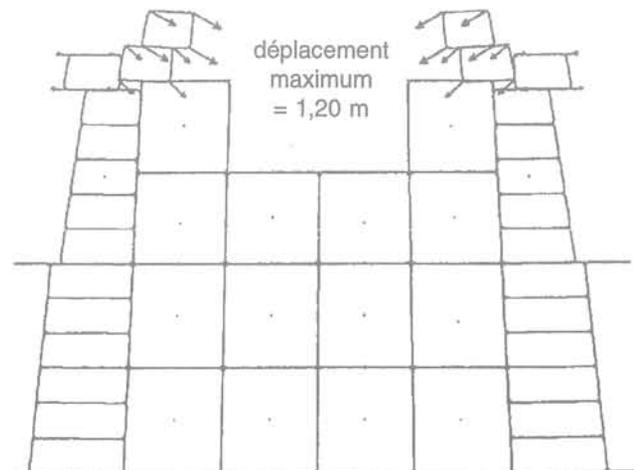


Fig. 10. — Instabilité se produisant au début de l'évidement.

Fig. 10. — Case of instability at the beginning of the excavation.

Si l'on peut s'attendre, en effet, à un glissement des blocs de parement sous l'effet de l'évidement et agir en conséquence en opérant une consolidation de leurs joints par injection de résine ou de ciment par exemple, il convient d'être prudent à la fin de l'évidement et de prévoir un écrasement possible des blocs les plus bas du parement sous l'effet de la charge des blocs supérieurs. En effet, comme le montre la figure 11, quand bien même le glissement des blocs de parement serait réduit (tangente de l'angle de frottement multipliée par 10 environ), si ces blocs sont fortement dégradés (fissurés ou imprégnés d'eau par exemple), ils peuvent s'écraser et se déformer au point de faire tomber l'ensemble des blocs sus-jacents.

8. CAS D'UN PAREMENT FORTEMENT DÉGRADÉ

En réalité, il est peu probable que l'angle de frottement des joints de parements soit aussi faible que celui utilisé dans la plupart des calculs précédents. Les valeurs retenues correspondent en effet à des angles de frottement de l'ordre de 1° . Par contre, un module d'élasticité fortement réduit peut parfaitement simuler une dégradation très nette des blocs de parements notamment s'ils sont fissurés ou en partie éclatés comme cela est le cas à Karnak.

Les résultats illustrés par la figure 11 sont donc à prendre en considération en vue d'assurer la stabilité du pylône au moment où les talats en seront retirés. Pour les mêmes données, comme le montre la figure 12, le basculement généralisé des parements se produit au moment où l'on retire 4 des 6 blocs restant dans le cœur du pylône, c'est-à-dire à l'avant-dernière étape conduisant à l'évidement total du pylône. A ce moment, on note une nette augmentation de la contrainte normale au point de contact intérieur situé entre la quatrième et la cinquième rangée de blocs de

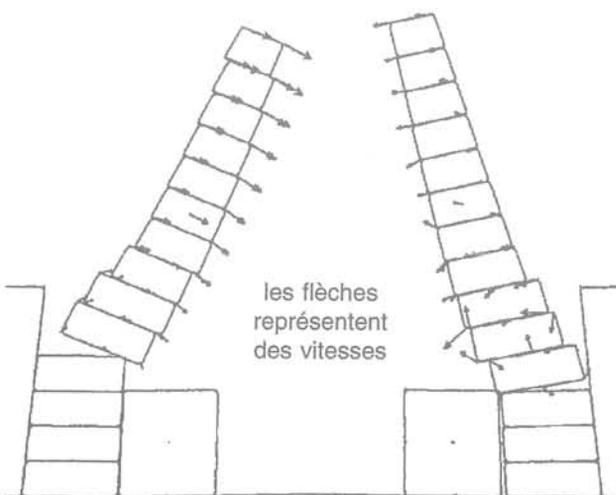


Fig. 11. — Instabilité se produisant vers la fin de l'évidement.

Fig. 11. — Case of instability at the end of the excavation.

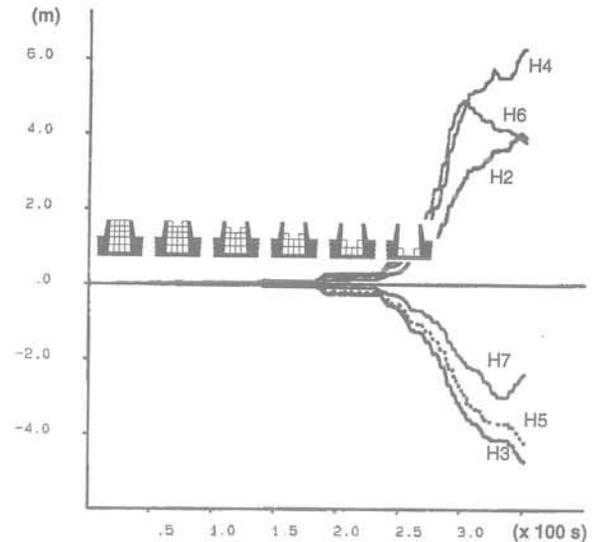


Fig. 12. — Evolution des déplacements aux parements.

Fig. 12. — Displacements of the side blocks.

parement (à partir du bas). Cette contrainte passe de 0,2 à 1,8 MPa environ et traduit une augmentation de la sollicitation à cet endroit due au basculement de la partie supérieure du parement (fig. 13). Ce basculement apparaît nettement déjà à l'étape précédente quand il reste encore 2 blocs au deuxième niveau de remplissage comme l'indique la figure 14. Il provoque, d'autre part, une fermeture des joints entre les blocs les plus bas du parement. La figure 15 indique ce comportement et montre l'évolution de l'effondrement du pylône. La légère dissymétrie apparaissant sur cette figure est uniquement due à des problèmes numériques liés à la résolution des calculs mis en jeu dans UDEC.

Il est donc nécessaire de tenir compte de cette simulation assez réaliste pour prévoir dès que possible un renforcement du pied du parement soit par injection d'un liant dans les blocs fissurés afin de leur assurer une meilleure tenue à la compression, soit par appuis

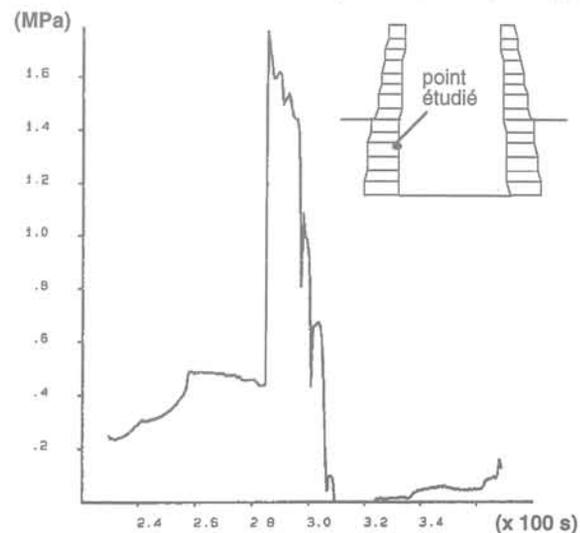


Fig. 13. — Contrainte normale au point E au moment de l'effondrement.

Fig. 13. — Normal stress at E point during the collapsing.

latéraux installés à l'intérieur du pylône afin d'éviter le moindre basculement du parement. Une combinaison de ces deux types de renforcement serait d'ailleurs souhaitable.

9. CONCLUSION

D'un point de vue méthodologique, les points suivants peuvent être soulignés :

— les résultats d'une simulation numérique doivent être confrontés avec des mesures in situ pour être parfaitement jugés. A défaut d'un tel calage, les phénomènes simulés n'ont qu'un caractère qualitatif ;

— les modèles numériques ne sont pas des représentations fidèles de la réalité malgré leur apparence sur l'écran d'un ordinateur. Ils reposent sur des lois de comportement approchées basées sur des expérimentations en laboratoire. Ils font notamment appel à un

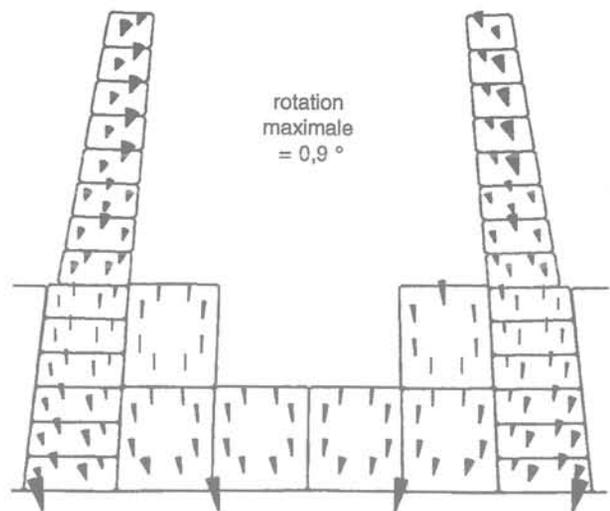


Fig. 14. — Rotation des blocs avant l'effondrement.
Fig. 14. — Block rotation just before the collapsing.

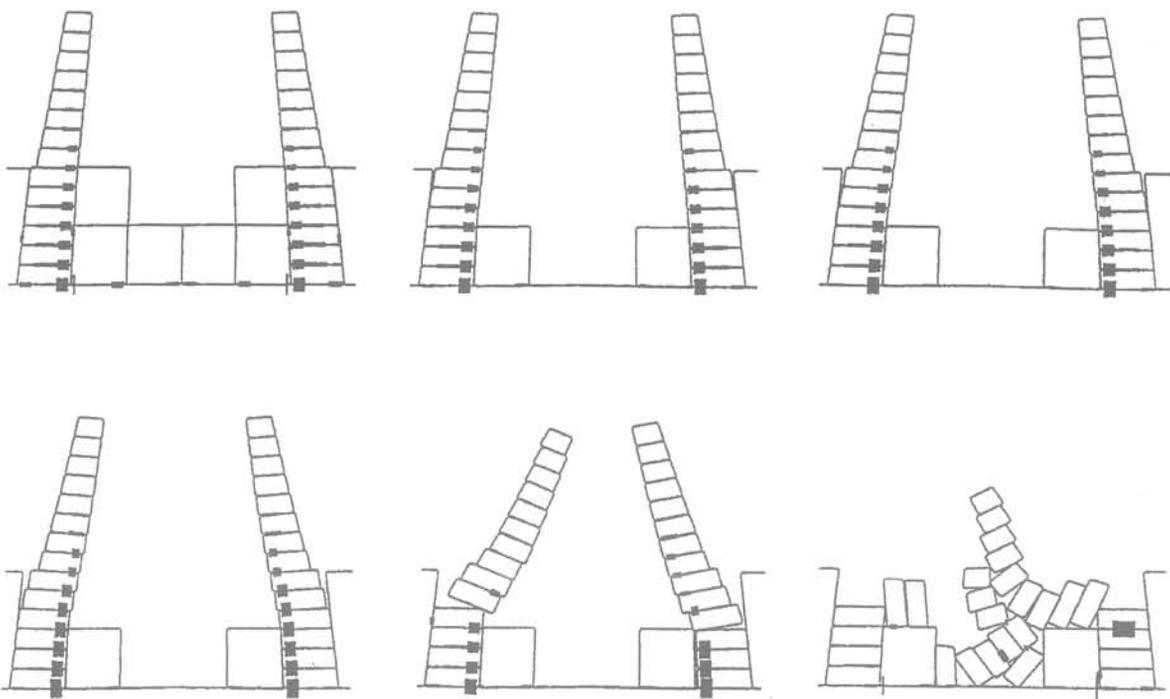


Fig. 15. — Evolution de l'effondrement dans le cas n° 7 avec indication de la fermeture des joints (max = 1 mm).
Fig. 15. — Collapsing in the case n° 7 with joint closure indication (max = 1 mm).

grand nombre d'hypothèses simplificatrices qu'il faut avoir à l'esprit au moment de l'exploitation des résultats qu'ils fournissent. A ce sujet, dans l'étude présentée, les blocs ont été considérés comme très longs ce qui n'est pas conforme à la réalité et augmente, dans les calculs, la stabilité du pylône. On peut donc craindre en réalité une instabilité plus grande que celle prévue théoriquement ;

— les modèles numériques ne résolvent pas tous les problèmes posés et une bonne connaissance du terrain est toujours nécessaire à leur bonne utilisation ;

— ces outils exigent par ailleurs l'expérience d'une longue pratique et la connaissance de leur fondement théorique afin de ne pas tomber dans les pièges qu'ils tendent souvent à leurs utilisateurs.

Mais, il apparaît dans ce travail que même si l'on ne dispose pas de données suffisantes ni de moyens de calage immédiats, la modélisation numérique est néanmoins utile. En revêtant un caractère avant tout phénoménologique, elle peut fournir un support d'analyse pour vérifier les hypothèses, mesurer leurs conséquences et peut également suggérer des mécanismes

plus complexes que ne pouvait le prévoir le bon sens. Dans une telle analyse, la recherche d'un modèle le plus discriminant possible constitue une méthode d'optimisation qui permet d'établir un compromis entre la fonctionnalité et le réalisme de la modélisation.

D'un point de vue opérationnel, cette démarche nous permet de faire les recommandations suivantes :

— la méthode d'évidement préférentielle consisterait à retirer les blocs de remplissage par bancs horizontaux en commençant par le milieu et en s'efforçant d'exploiter un banc inférieur quand il reste encore des blocs supérieurs près des parements, afin d'assurer un déchargement progressif des parements, sujets aux déformations les plus redoutées ;

— mais la connaissance du milieu étudié est insuffisante et il serait souhaitable d'avoir des informations plus précises sur l'état de conservation du pylône, par l'évaluation de la dégradation des parements (nombre et qualité des fissures), de leurs propriétés et de leur comportement mécanique (échantillons et étude en laboratoire, mesure in situ de l'évolution dans le temps des fissures ou de l'inclinaison de ces parements au moyen de fissuromètres ou d'inclinomètres) ;

— un renforcement des joints et des blocs de parements eux-mêmes s'annonce quasiment nécessaire étant donné leur état apparent observé sur le site. Il consisterait à injecter un liant permettant d'assurer une meilleure friction entre les blocs et une meilleure tenue mécanique des blocs fracturés. Néanmoins, ce renforcement peut avoir un caractère provisoire et un renforcement définitif pourrait être installé après l'évidement, un accès intérieur devenant possible ;

— de plus, il est important de suivre le comportement des parements en cours d'évidement au moyen de capteurs de déplacement ou d'inclinomètres et de veiller à ce que des blocs dégradés situés en bas des parements ne soient pas soumis à trop forte charge. Si un basculement du parement est observé, il convient de le stopper au plus vite au moyen d'une structure de type soutènement boisé ou métallique s'appuyant sur certains éléments du remplissage encore en place, un tel soutènement pouvant s'adapter à l'avancement de l'opération d'évidement. Le soutènement provisoire devra, s'il est requis, toujours anticiper une éventuelle déformation, c'est-à-dire être immédiatement en service ;

— enfin, l'étude présentée ne rend compte que du comportement de la partie centrale du pylône. Pour la partie haute, des précautions spéciales sont à étudier, un calcul en trois dimensions est possible, un soutènement approprié ou même un démontage partiel de cette zone peut être envisagé.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier vivement l'Organisation des Antiquités Égyptiennes ainsi que le centre franco-égyptien pour l'étude des temples de Karnak qui ont permis d'accéder aux sites historiques et d'y mener relevés et observations.

BIBLIOGRAPHIE

- MARTINET G. (1992), *Grès et mortiers du Temple d'Amon à Karnak (Haute-Egypte). Etude des altérations, aide à la restauration*. Thèse de doctorat, Université de Tours, Laboratoire de Géologie des Systèmes Sédimentaires, Tours.
- HELAL H., ABDALLAH T., BAROUDI H. (1991), *Behaviour of ancient cavities in discontinuous media : the baboon tomb case study, Saqqarah*. International Symposium on Static and Dynamic Considerations in Rock Engineering, Royal Swazi SPA, Swaziland, 10-12 sept. Tiré à part.
- COSTET J., SANGLERAT G. (1983), *Cours pratiques de mécanique des sols*. Tome 2 : calculs des ouvrages, Ed. Dunod, Paris.
- HART R.D. (1990), *Discontinuum analysis for deep excavations in jointed rock*, International Symposium on Rock at Great Depth, Pau, France, p. 1123-1130. Ed. Maury & Fourmaintraux, A.A. Balkema, Rotterdam.
- SAUNERON S. (1968), *Cahiers de Karnak I et II*, Centre franco-égyptien pour l'étude des temples de Karnak, Louxor.
- STARFIELD A.M., CUNDALL P.A. (1988), *Toward a methodology for rock mechanics modelling*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, n° 25-3, p. 99-106, Ed. Pergamon Press, Londres.