

# Stabilité de l'hypogée de Ramsès II (Vallée des Rois, Louqsor, Égypte) Modèles numériques et réalité

**André GUILLAUME**

Laboratoire d'archéologie et d'histoire thébaines  
(LAHTES. CNRS - Musée du Louvre)

**Jean-Michel PIAU**

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

## RÉSUMÉ

La géométrie de la tombe de Ramsès II, la stratigraphie des colluvions qui encombraient cette cavité et les paramètres mécaniques utilisés pour les modélisations numériques de cette structure, qui est creusée à la limite entre des calcaires et des argilites gonflantes, sont d'abord décrits. Les résultats d'observations de terrain, d'essais en laboratoire, de modélisations 3D phasées fondées sur la méthode des éléments finis (logiciel CESAR-LCPC) et de calculs à la rupture sont ensuite présentés ; ils concernent d'une part la stabilité initiale de la structure, d'autre part une description des premiers désordres apparus dans celle-ci à la suite des inondations et du gonflement des argilites. Il est notamment montré que les dalles calcaires réservées au-dessus des argilites pour former les sols des grandes salles étaient trop élancées pour résister à ce gonflement. Un chapitre particulier traite enfin de la technicité des anciens Égyptiens en matière de conception architecturale.

DOMAINE : Géotechnique et risques naturels.

## ABSTRACT

**STABILITY OF THE TOMB OF RAMESSES II  
(VALLEY OF THE KINGS, LUXOR, EGYPT) ;  
NUMERICAL MODELS AND RELITY.**

*The geometry of the tomb of Rameses II, the stratigraphy of the flood debris that fill this cavity and the mechanical parameters used for numerical modeling of this structure (which has been excavated at the boundary between limestones and swelling shales) are at first presented. Results from field observations, laboratory testing, phased 3D modeling based on the finite elements method (applying CESAR-LCPC software package) and failure computations are then displayed. This section covers initial stability of the structure and a description of the first apparent disorders in the structure subsequent to flooding and shales swelling. It is shown, in particular, that the limestone slabs reserved on the shales by the artisans in order to form the floors of the large rooms were too thin to support such swelling. A special section at the end of the article is devoted to the technical capabilities of ancient Egyptians in the area of architectural design.*

*FIELD: Geotechnical engineering and natural hazards.*

## Introduction

Lorsque Champollion pénétra pour la première fois dans la tombe de Ramsès II en rampant sur les sédiments torrentiels qui l'encombraient, il remarqua qu'il régnait dans cet hypogée en ruine « une chaleur étouffante », mais effectua néanmoins là des relevés épigraphiques fondamentaux... Quelques décennies plus tard, Lepsius dessina le premier plan détaillé de la structure. Pendant plus d'un siècle, la tombe ne fut plus visitée qu'épisodiquement. Dans les années 1970, les équipes américaines (Bothmer *et al.*, 1975 ; Curtis et Rutherford, 1981 ; Rutherford *et al.*, 1977) relancèrent l'intérêt de la communauté scientifique pour cet hypogée et montrèrent le rôle important des marnes gonflantes dans la ruine de certaines tombes thébaines, dont celle de Ramsès II.

Le laboratoire d'archéologie et d'histoire thébaines (LAHTES, URA n° 1064 du CNRS et du musée du Louvre) a entrepris en 1993 l'étude systématique de cette tombe (comptes rendus de fouilles *in* : Leblanc, 1996-2000). Les techniques modernes du Génie Civil ont permis au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et au Centre d'Études Techniques de l'Équipement de Lyon (CETE) de conforter suffisamment la cavité, par ancrage des blocs de toit instables, pour que les fouilles de cet hypogée et les déblaiements puissent être réalisés dans une relative sécurité. Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la collaboration entre le CNRS et le LCPC sur l'étude quantitative de sites archéologiques de Louqsor. Pour ce qui concerne la tombe de Ramsès II, des publications communes ont présenté régulièrement les résultats de ces recherches, tant sur le plan de la structure actuelle de l'hypogée que sur la modélisation numérique de la chambre sépulcrale et sur les propriétés des roches (Côte *et al.*, 1996 ; Évrard et Guillaume, 1997 ; Guillaume *et al.*, 1997, 2001).

La modélisation numérique peut être mise à profit pour analyser les tombes souterraines de la Vallée des Rois sur le plan de la conception architecturale, bien que les structures de ces tombes soient assez compliquées (présence fréquente de collatéraux et de salles annexes) : les hypogées sont creusés dans un ensemble géologique à structure tabulaire et la géométrie de chaque tombe est connue avec une précision suffisante à l'échelle des études. Couplée avec les observations de terrain et l'analyse des résultats d'essais, la représentation virtuelle des tombes permet de tester différentes hypothèses concernant l'évolution de ces structures et de mieux comprendre les phénomènes qui ont conduit à leur ruine.

L'analyse architecturale quantitative facilite la comparaison de différents éléments structuraux des tombes royales, notamment les chambres sépulcrales, l'objectif étant de retrouver certaines règles de construction, non écrites, utilisées par l'école d'architectes antiques qui, pendant un siècle et demi au moins, a fait creuser les hypogées des pharaons ramessides. Enfin, elle peut contribuer à la recherche de solutions pertinentes pour le confortement de ces tombes et constituer une première étape dans l'élaboration du cahier des charges de ces travaux.

## Situation et description générale de la tombe de Ramsès II

Situé à la marge orientale du désert libyque (ou désert de l'Ouest ; fig. 1), le Plateau thébain est constitué par trois ensembles d'âge tertiaire qui sont, de bas en haut : les calcaires de Tarawan (épaisseur supérieure à 30 m), les roches argileuses de la formation d'Esna (60 m) et les calcaires de la formation de Thèbes (350 m). Dans la Vallée des Rois, qui forme une reculée dans cette structure tabulaire, la partie supérieure de la formation d'Esna est constituée d'argilites souvent litées et de marnes, armées par des bancs de calcaires marneux d'épaisseur décimétrique. Les niveaux inférieurs de la formation de Thèbes sont des calcaires sub-crayeux, un peu argileux, renfermant quelques lits de silex rognoneux et très massifs en profondeur. Ces niveaux créent des reliefs adoucis à la base des versants de la haute Vallée des Rois ; nombre de tombes royales y sont creusées.

Le massif est affecté par deux familles de cassures pré-pharaoniques : un ensemble de diaclases et de failles subverticales à rejet millimétrique voire centimétrique, de direction moyenne N 70 à 80, et des diaclases et failles Nord-Sud (« faille de la Vallée des Rois »), subverticales et à rejet décimétrique, postérieures aux précédentes dans la tombe de Ramsès II. Les roches constituant l'enveloppe de cette tombe sont également intéressées par des fractures horizontales, restes probables de failles listriques intéressant le versant ouest de la vallée du Nil. Nombre de cassures anciennes ont été réactivées lors de la ruine de la tombe.

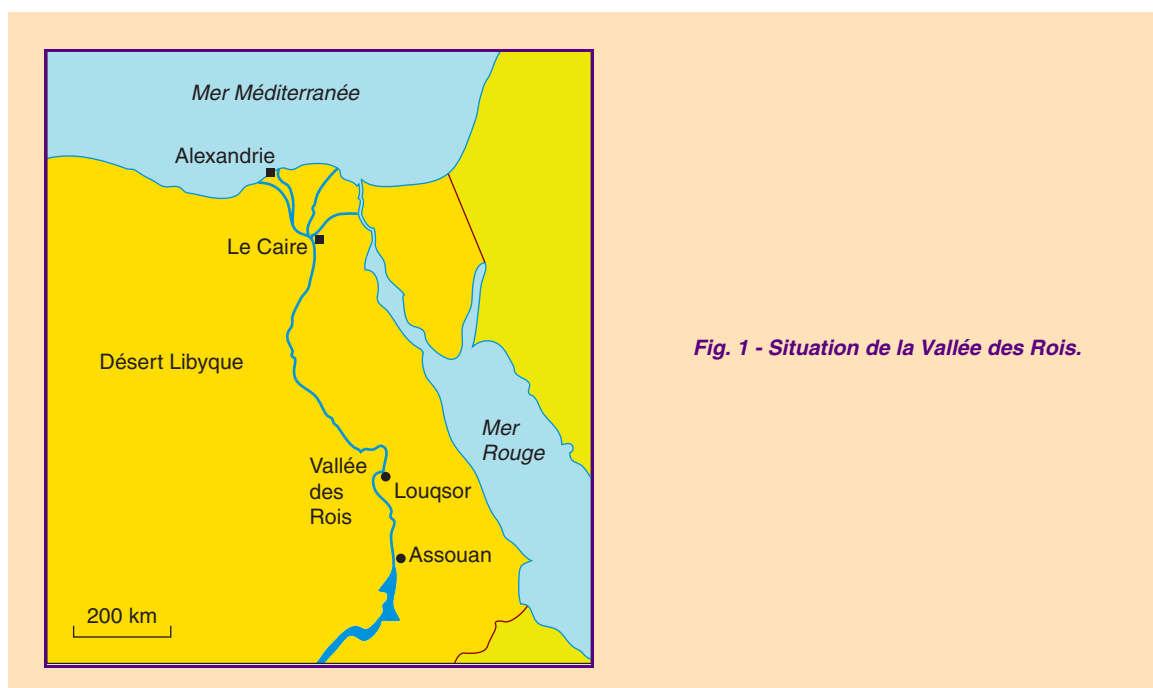


Fig. 1 - Situation de la Vallée des Rois.

## Architecture – Géologie

La tombe de Ramsès II a été creusée à la limite des calcaires de Thèbes et de la formation argileuse d'Esna, à une cinquantaine de mètres de profondeur sous le versant ouest de la Vallée. Située à l'extrémité d'un long corridor d'accès (fig. 2) et précédée par une antichambre (salle I, fig. 2 et 3), la partie principale de cet hypogée est constituée par une grande chambre sépulcrale (salle J ; coupe verticale fig. 3) et par des salles annexes de différentes tailles (K à Q2).

### Chambre sépulcrale

Cette chambre, cœur de l'hypogée, montre une fosse encastrée dans les argilites qui couronnent ici la formation d'Esna (fig. 3), dont le toit calcaire est voûté en anse de panier et qui est flanquée, sur ses bords occidentaux et orientaux, par deux bas-côtés à toits plats.

Le sol et les parois argileuses de la fosse avaient été revêtus d'un mortier blanchâtre, riche en carbonate de calcium (Bothmer et al., 1975 ; Guillaume et al., 1995, 1997, Guillaume, 2001-2002), très probablement destiné à stabiliser les argiles gonflantes. Les artisans de l'époque pharaonique ont creusé, dans les couches d'Esna de la fosse, une cavité profonde d'environ 2 m (cavité dite « des canopes » ; lettre c sur le plan de la fig. 3) et présentant une coupe des niveaux argileux : sous un niveau épais d'une trentaine de centimètres qui se débite en plaquettes lustrées, les structures sédimentaires des argilites sont assez bien conservées. La fraction argileuse du sédiment est composée essentiellement par des interstratifiés illite-smectites (10-14 sm) de type beidellite aluminomagnésio-ferrifère, avec 75 % de feuillettes smectitiques (analyse du C.G.S., Strasbourg ; Guillaume et al., 2001) ; des zones riches en sulfate, en carbonate de calcium et en goéthite forment des pseudonodules relativement rigides au sein de la masse argileuse. Ces niveaux, qui montrent deux plis orientés Ouest-Est (fig. 4), dont l'un a dégénéré en pli-faille, sont supportés par un banc de calcaire marneux détecté par radar ailleurs sous la salle (Côte et al., 1996). Un forage réalisé dans le sol de la fosse (près du pilier p4) jusqu'à 2,2 m de profondeur n'a pas rencontré de vide, et une prospection

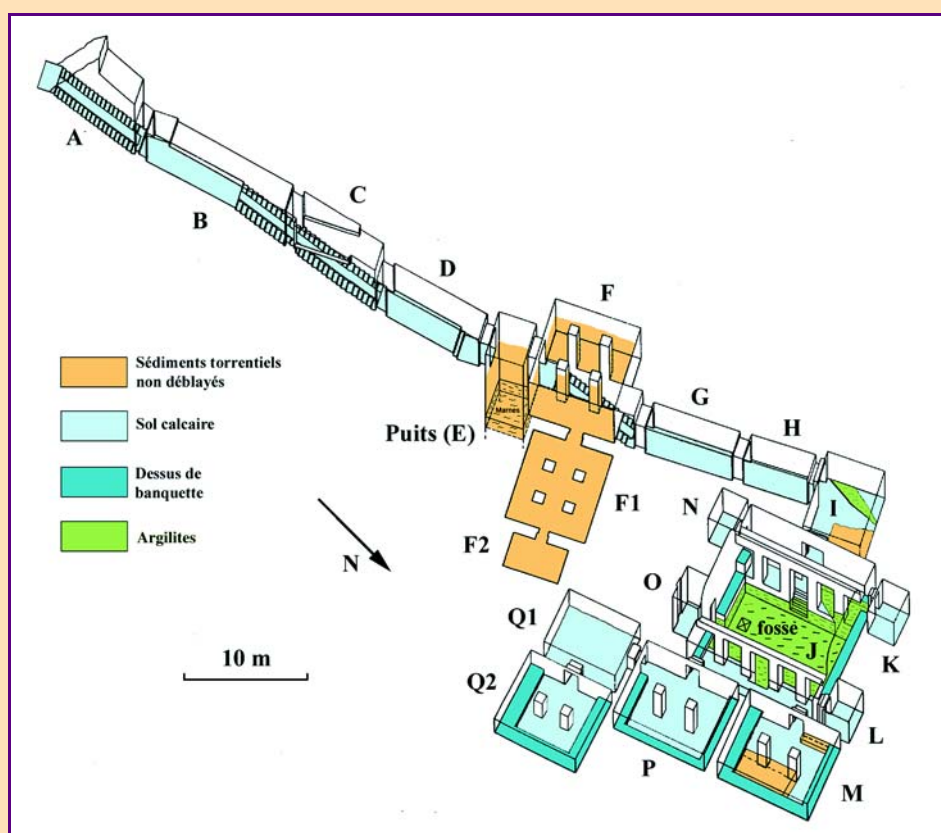
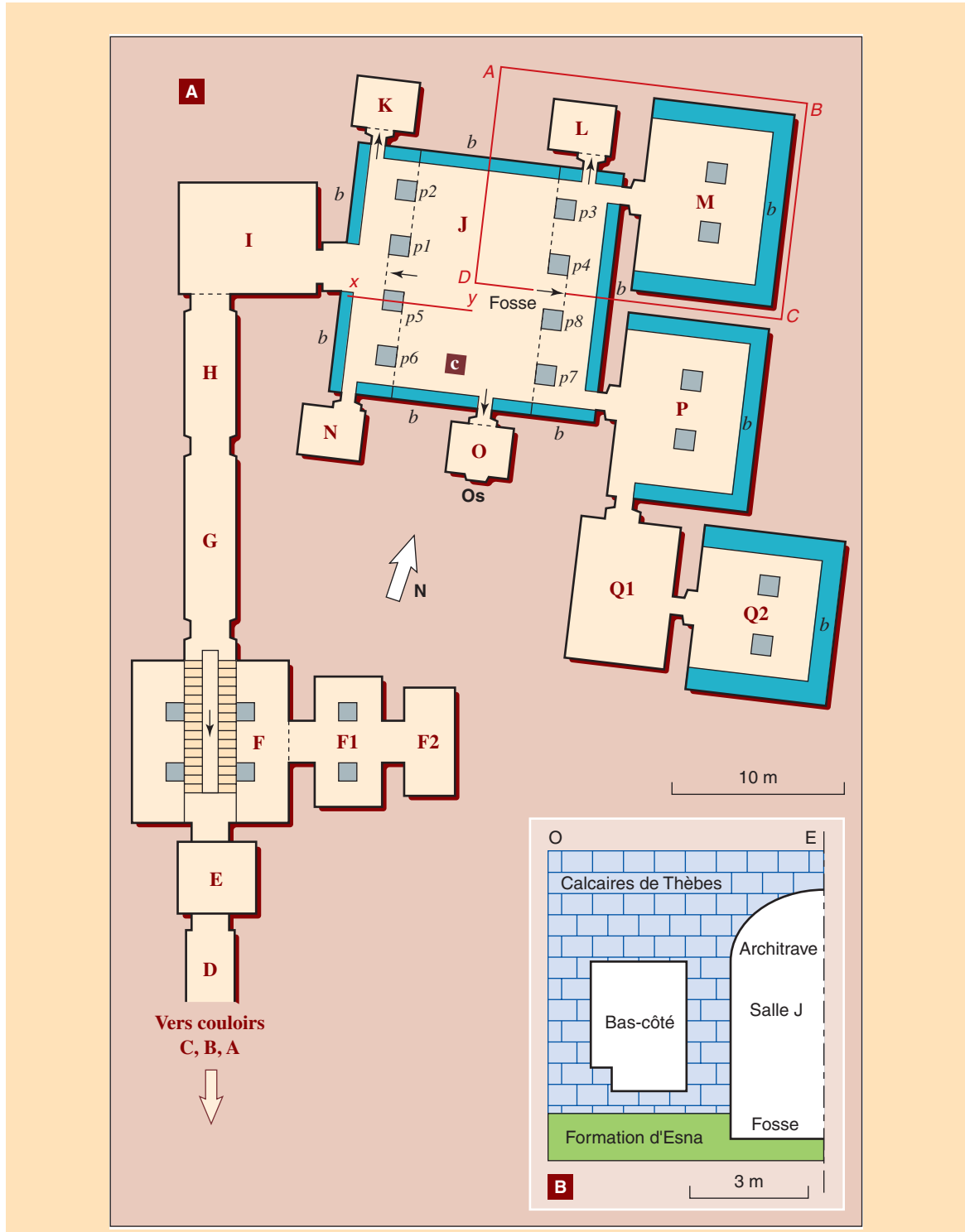


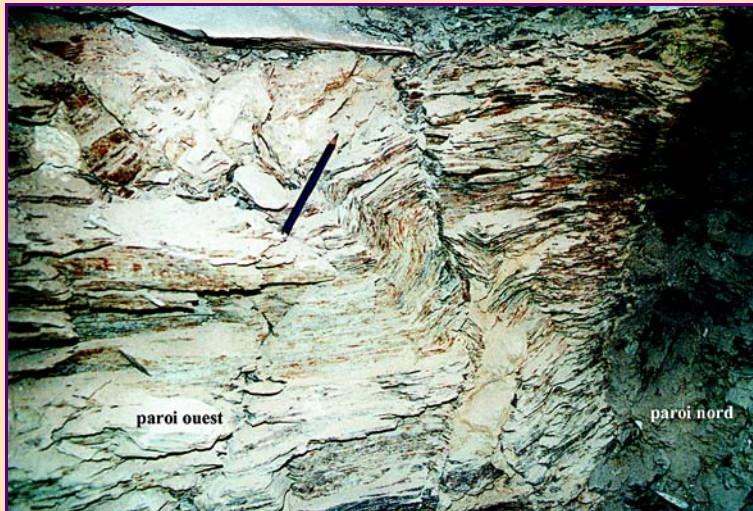
Fig. 2 - Axonométrie de la tombe de Ramsès II, d'après les relevés du Theban Mapping Project, complétés. État en 2001. Les salles F1 et F2, dont la géométrie n'est pas connue précisément (encombrement par des colluvions), sont figurées seulement en plan (une liaison pourrait exister dans ce secteur avec la tombe des enfants de Ramsès II : KV5). N : Nord géographique.

microgravimétrie n'a pas décelé la présence d'une autre grande salle sous la chambre sépulcrale de Ramsès II (Guillaume, 2000).

Le sol calcaire des bas-côtés, épais de 0,5 à 0,6 m, supporte, réservées dans la masse du calcaire, des petites banquettes parallélépipédiques qui sont, maintenant et en général, décollées des parois et



**Fig. 3 - Tombe de Ramsès II : A : plan de la chambre sépulcrale et de ses annexes (d'après les relevés du TMP, modifié). N : Nord géographique (dans cet article, la direction Nord-Sud est, par convention et pour simplifier, celle de l'axe de la voûte). Les flèches indiquent la présence d'un escalier et le sens de la montée ; b : banquette ; c : cavité des canopes ; p1 à p8 : piliers ; Os. : restes d'une statue d'Osiris. Rectangle rouge ABCD : limites du modèle de référence. B : coupe verticale perpendiculaire à l'axe de la voûte de la salle J. Cette coupe intéresse un pilier (trace x-y sur le plan) et résume la stratigraphie des terrains enveloppant l'hypogée. La dalle calcaire formant le sol du bas-côté se prolongeait au même niveau dans les annexes M, N, O, P, Q1 et Q2.**



**Fig. 4 - Pli dans les argilites de la fosse de Ramsès II (cavité des canopes). Les zones rougeâtres qui soulignent la stratification sont des zones carbonatées et sulfatées, riches en goethite. (Cliché et traitement numérique : © A. Guillaume,**

décrochées (relativement) vers le haut. Dans la partie nord-ouest de la salle, le bas-côté est constitué par une lanière de roches d'Esna remontées à la faveur de failles pré-pharaoniques Nord-Sud de quelques décimètres de rejet vertical. Les toits plats des bas-côtés étaient soutenus chacun par quatre piliers (de section 1 m × 1 m), réservés eux aussi, reliés entre eux par des architraves épaisses de près de 0,7 m. Le pilier nord-ouest (p2), en calcaire, s'appuyait directement sur les argilites formant le bas-côté.

Les pieds de voûte, une grande partie des toits des bas-côtés, les architraves, les parties supérieures des piliers et les sols calcaires entre les piliers sont maintenant ruinés.

### **Salles annexes**

Les petites salles annexes (fig. 2 et 3 ; K, L, N et O) ont des toits plats et des murs mitoyens avec la salle J assez minces (0,7 à 0,9 m). La dalle calcaire formant continûment les sols des bas-côtés de la salle J et ceux de ces pièces est épaisse de 0,5 m dans la salle N et de 1,1 m dans les annexes K et L. La surface du sol de la salle O est bombée ; elle forme un demi-dôme, d'une trentaine de centimètres de hauteur, dont la partie supérieure est tronquée. Cette forme particulière est analysée plus loin (§ « Ruine de la structure et évolution ultérieure : annexe O » ; p. 39).

Le bas-côté oriental de la salle J donnait, de plein pied, sur deux grandes salles (M et P) à toits plats. Le mur mitoyen entre ces salles est presque complètement disloqué et ne joue plus que ponctuellement son rôle de soutènement. Il montre des fractures sub-horizontales ouvertes spectaculaires, dont certaines se réfractent sur des cassures Ouest-Est anciennes. La salle P donne sur une suite de deux salles à toits plats (Q1 et Q2) de dimensions réduites.

Les dalles calcaires formant les sols de ces grandes annexes prolongeaient celle du sol du bas-côté oriental de la salle J. Un forage avec carottage réalisé dans le sol de la salle M a montré que l'épaisseur du calcaire est, là aussi, d'une cinquantaine de centimètres, et que le calcaire repose sans discontinuité (absence de vide) sur les argilites bariolées d'Esna. Ces dalles ont été fracturées et soulevées par la poussée des argilites gonflantes.

Les salles M, P et Q2 étaient équipées chacune de deux piliers carrés maintenant ruinés ; le pilier nord de la salle P est spectaculairement enfoncé (relativement) dans son substratum (cf. illustration de la couverture). Sauf le long des murs occidentaux, des banquettes avaient été réservées dans la masse calcaire enveloppant ces trois annexes. Leurs parties inférieures étaient évidées, mais des jambages régulièrement espacés les reliaient au sol et assuraient leur stabilité. Dans les angles orientaux de ces salles, les banquettes n'avaient pas été creusées et formaient ainsi des coins, d'un volume de plus d'un mètre cube pour les banquettes les plus profondes (salle Q2). En général, ces banquettes sont maintenant décollées des murs et décalées (relativement) vers le haut le long de décrochements spectaculaires (visibles dans la salle M avant que celle-ci ne soit déblayée ; Guillaume et *al.*, 1997). La salle Q1 ne comporte ni piliers ni banquettes. Il est remarquable que son toit soit presque intact, alors que son sol est disloqué.

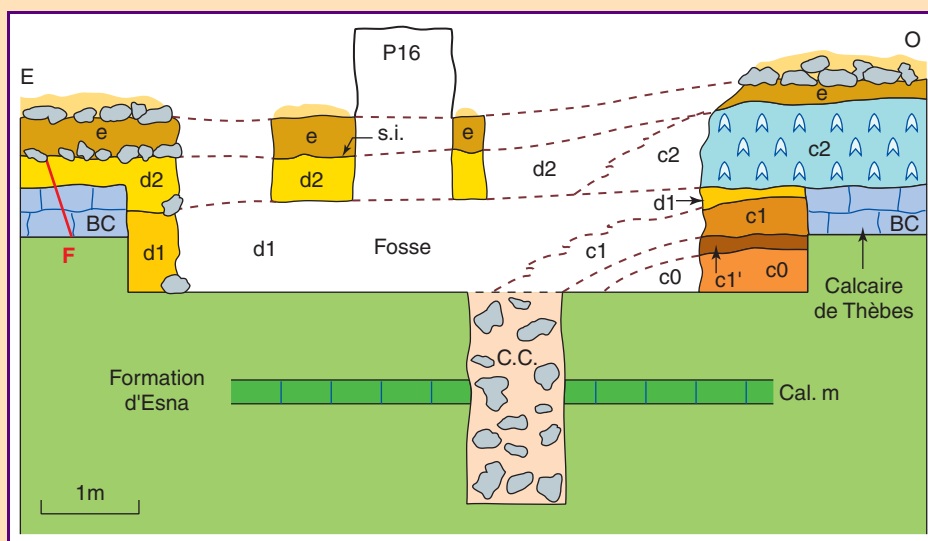
## Sédiments torrentiels de remplissage

Trois ensembles de colluvions, maintenant presque complètement déblayés, s'étaient déposés sur les sols de la partie basse de la tombe (fig. 5). Les deux premiers étaient constitués, à l'Ouest, surtout par des brèches calcaires (éclats de taille), qui passaient vers l'Est à des niveaux presque exclusivement sableux (sables calcaires) provenant du lessivage des sols du bassin versant de la haute vallée. Le troisième était essentiellement formé de sables calcaires.

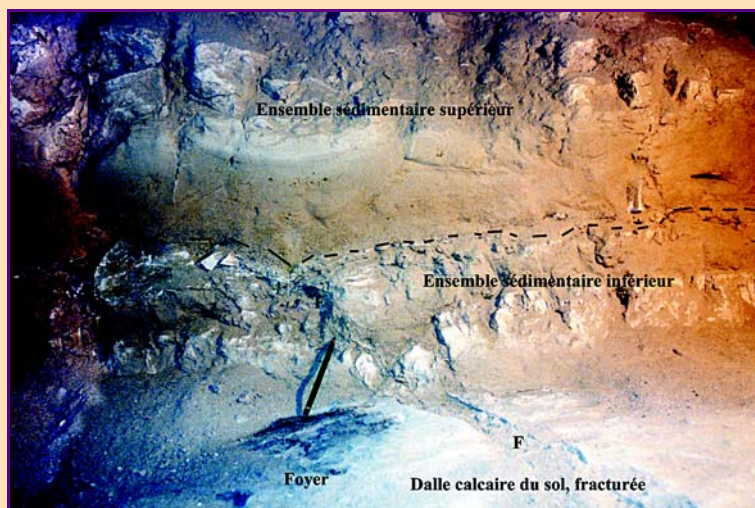
Dans la fosse, l'ensemble inférieur (c1', c1 et d1) succédait à une masse de sédiments détritiques d'origine peut-être locale (c0). Un deuxième ensemble (c2 et d2) débordait largement de la fosse vers les grandes annexes ; là, il remplissait les dépressions de son substratum calcaire cassé et déformé à la suite du gonflement des argilites ; son épaisseur variait d'une trentaine de centimètres au milieu, à 50 voire 60 cm sur les bords des salles (nivellement du relief). Dans les grandes annexes, des sédiments plâtreux constituaient des masses discontinues, informes et à contours dif-fus, à la base de l'ensemble d2 ; ces sédiments pouvaient provenir du mortier de revêtement des sols détruit sur place au moment du dépôt des sédiments d1 dans la fosse, puis remanié à la base de l'ensemble d2, au début de la deuxième inondation générale.

Dans les salles M, P (par continuité), Q1, Q2, O et J (partie sud), la surface supérieure de l'ensemble d2 était indurée ; cette surface était sub-horizontale à l'échelle décamétrique, mais légèrement bombée à l'échelle métrique (flèche verticale de 1 à 2 cm) dans les salles Q1 et M, où elle tendait à épouser la forme du sol calcaire. Dans la fosse, cette surface avait été érodée lors de la mise en place des colluvions c2/d2 (passage apparemment progressif des sables calcaires d1 aux sables calcaires d2).

Le deuxième ensemble (c2 et d2), intéressé par au moins une fracture de son substratum calcaire dans la salle Q1 (fig. 6), était recouvert en discordance par les colluvions d'un troisième ensemble (e). L'intervalle de temps séparant les dépôts des sédiments c2/d2 et e a dû être assez court, la surface de l'ensemble d2 n'étant pas très dure (un fragment de charbon de bois de taille millimétrique et des blocs calcaires de petite taille étaient fichés dans cette surface).



**Fig. 5 - Relations entre les colluvions déposées dans les parties basses de la tombe : coupe synthétique à travers la fosse et les bas-côtés (BC) de la salle J (état en 1993) ; les zones sans figuré avaient été déblayées avant 1993. Les contours de la cavité des canopes (C.C., remplie de déblais) et de la porte de la salle O (P16), sont projetés schématiquement sur le plan de la coupe, qui passe entre les piliers p5 et p6 de la salle J. La faille F intéresse le calcaire et la couche d2 ; elle rappelle ici que le sol calcaire a été fracturé, dans la salle Q1 au moins, avant le dépôt des colluvions notées (e). s.i. : surface indurée ; cal.m. : banc de calcaire marneux interstratifié dans les couches argileuses d'Esna, trouvé dans une poche de pillage, affleurant dans la cavité des canopes et détecté ailleurs, sous la fosse, par radar.**



*Fig. 6 - Sédiments torrentiels dans la salle Q1 (secteur nord-est). F : cassure affectant le sol calcaire et le premier ensemble de sédiments (colluvions d2 dans le texte) ; Foyer : trace d'un foyer antérieur à la cassure (Cliché et traitement numérique : © A. Guillaume, CNRS). L'ensemble sédimentaire supérieur (colluvions e dans le texte) est peut-être constitué par deux niveaux (apports correspondant à deux venues d'eau).*

## Principaux événements concernant l'hypogée

Plusieurs événements (n° 1, 6, 7, 9, 10 du tableau I) peuvent être distingués en vue de l'analyse quantitative de l'évolution de la structure. Après le creusement (événement 1), la première inondation générale (événement 6) affectant la tombe a apporté des sables calcaires fins et des éléments grossiers qui ont d'abord rempli (ou achevé de remplir) le puits. Les éléments grossiers se sont ensuite déposés par accréation dans les couloirs d'accès jusqu'à la fosse, comblée principalement par des brèches (c1) dans sa partie occidentale et des sables (d1) dans sa partie orientale (fig. 5). L'eau déborda en dehors de la fosse et envahit le bas-côté oriental de la salle J et les annexes. L'enveloppe calcaire de la tombe fut alors entièrement imbibée d'eau, directement ou par capillarité ; l'eau de cette première inondation (événement 6) traversa les calcaires fissurés et pénétra dans les argilites dont elle provoqua le gonflement, engendrant alors des désordres majeurs. Une deuxième inondation générale (événement 7) apporta de nouvelles colluvions (c2 et d2) jusque dans les grandes annexes et accentua la ruine. Après induration de la surface supérieure de ces colluvions d2 (événement 8), une troisième inondation (événement 9) de l'ensemble de la tombe provoqua le dépôt de la couche supérieure (e) de colluvions ; elle n'engendra que peu de désordres. D'autres inondations (événements 10) ont ensuite affecté l'hypogée et déposé des colluvions essentiellement dans les parties hautes de celui-ci (corridors supérieurs et salles F, F1 et F2).

L'événement 9 et ceux qui le suivirent ne présentent pas d'intérêt particulier pour la présente étude. Nos modélisations ne considèrent donc que l'état de l'hypogée après le creusement (événement 1) et les deux premières périodes orageuses qui ont intéressé l'ensemble des parties basses de la tombe, soit : l'événement 6, surtout, auquel correspond le dépôt du premier ensemble de colluvions (c1/d1), et, secondairement, l'événement 7 (avec dépôt des colluvions c2/d2). Mais plusieurs venues d'eau distinctes (orages), toutefois difficiles à individualiser sur le terrain (donc à modéliser), ont pu affecter la structure au cours de chacune de ces deux périodes. L'analyse de modèles comportant un plus grand nombre de phases aurait cependant conduit aux mêmes conclusions que celles exposées ici : en effet, deux (au maximum) apports d'eau intéressant l'ensemble de la tombe ont largement suffi pour provoquer la ruine de la structure.

## Représentation géométrique de l'hypogée

Comme la plupart des hypogées de la Vallée des Rois, celui de Ramsès II est une structure compliquée, qui ne peut être représentée fidèlement que par des modèles tridimensionnels. Un compromis doit donc être trouvé entre, d'une part, la finesse de la représentation de la structure et, d'autre part,

**TABLEAU I**

**Événements concernant l'hypogée de Ramsès II. p : phases des tableaux II et III**

Siècle	Dépôt	Zone de dépôt	Événements	P
- 13	-	-	(1) creusement ; dégradations locales réparées	1
- 11	-	-	(2) abandon de la tombe	
- 3 à + 4	a, b ?	puits (E)	(3) visites ; graffiti ; foyers au sol	
4 à (7 ?)	-		(4) occupation (religieux)	
?	c0	fosse Ouest pied pilier p4	(5) venues d'eau et dégradations locales ? remaniement des mortiers des sols	
?	c1', c1, d1	salle E à fosse	(6) inondation générale ; gonflement des argilites ; désordres importants dans la salle J et dans les grandes annexes ; ruptures de piliers	2
?	c2, d2	partout	(7) inondation générale ; poursuite du gonflement des argilites et des désordres .	3
?			(8) induration de la surface de d2	
?	e	partout	(9) inondation générale ; dégâts limités	
?	dépôts	zones hautes	(10) quatre inondations au moins	
18-19	dépôts	comblement de couloirs de fouille	(11) Sicard (?) ; Browne (?) ; Expédition d'Égypte ; Salt ; Champollion ; Wilkinson ; Lepsius (topométrie) ; Lefébure	
20 (a)	dépôts	idem	(12) Carter ; H. Burton ; Maystre	
20 (b)	-	-	(13) Bothmer et <i>al.</i> ; Rutherford et <i>al.</i> ; TMP (topométrie) ; LATHES-LCPC/CETE de Lyon (confortements ; déblaiements ; analyse systématique)	

les capacités des ordinateurs et des logiciels utilisés pour analyser la stabilité de l'hypogée. En tenant compte des propriétés de symétrie des salles (fig. 3), le modèle le plus complet est constitué par le quart nord-est de la salle J elle-même et les annexes L et M. Ce modèle, délimité en plan sur la figure 3 (rectangle ABCD), est appelé plus loin « modèle de référence ». Les conclusions tirées des modélisations de la salle M s'appliquent aussi à la salle P, symétrique de la salle M par rapport au plan vertical médian Ouest-Est de la salle J. De plus, l'observation montrant que les sols des salles M, P, Q1 et Q2 ont évolué de manière semblable, les renseignements obtenus à ce propos pour la salle M sont, en première approche au moins, applicables aux autres grandes annexes. Enfin, des modèles complémentaires ont été construits pour analyser le comportement d'ensembles particuliers : – salles J et O – salle M seule avec discontinuités (éléments de contact).

## Paramètres des modélisations – Lois de comportement

### Paramètres des modélisations

Divers essais géotechniques ont montré la variabilité relativement importante des propriétés physiques des roches utilisables pour les modélisations à sec et à saturation (données et discussions *in* : Guillaume, 2001-2002). Pour faciliter les comparaisons, les mêmes paramètres ont été utilisés pour les modélisations (tableau II). D'autres valeurs des paramètres de gonflement des argilites ont été prises en compte pour des études de sensibilité (« Variantes de la phase 2 » : p. 30).

Une étude de l'influence du relief sur la distribution des contraintes dans le massif, à structure tabulaire, qui abrite les tombes royales de la Vallée des Rois (Guillaume, 2001-2002), a montré que les



**TABLEAU II**  
**Paramètres utilisés pour les trois phases des modélisations**

Phases	1	2	3
<b>Calcaires</b>			
$\rho$ (MN/m <sup>3</sup> )	0,021	0,021	0,021
E tombe (MPa)	22 500	13 000	13 000
E extensions (MPa)	22 500	22 500	22 500
Rc et Rt (MPa)	56 et 9	13,5 et 2	13,5 et 2
$\varphi$ (°)	35	30	30
$\nu$	0,2	0,2	0,2
$K_0$	1	1	1
Piliers	présents	présents	absents
<b>Argilites</b>			
$\rho$ (MN/m <sup>3</sup> )	0,0218	0,0218	0,0218
E (grandes salles) (MPa)	6 000	273/750	273/750
E (salle L) (MPa)	6 000	857/2354	857/2354
E (salle O) (MPa)	6 000	750/2354	n. m.
E extensions (MPa)	6 000	6 000	6 000
$\nu$	0,4	0,3	0,3
$K_0$	1	1	1

$\rho$  : poids volumique.  $E$  : module d'Young ; pour les grandes salles ( $J$  et  $M$ ) et les petites salles ( $L$  et  $O$ ) et les phases 2 et 3, les valeurs des modules inscrites à gauche concernent les argilites situées sous les salles elles-mêmes ; celles inscrites à droite se rapportent aux argilites supportant les murs et les fronts de taille calcaires.  $R_c$  et  $R_t$  : résistances à la compression et à la traction.  $\varphi$  : angle de frottement interne.  $\nu$  : coefficient de Poisson.  $K_0$  : coefficients de poussée latérale des terres. n. m. : phase non modélisée. L'enveloppe calcaire de la tombe est supposée saturée immédiatement d'eau au début de la phase 2. Les poids des sédiments torrentiels et de l'eau ont été négligés (phases 2 et 3) devant ceux des autres roches.

directions principales étaient sub-verticale (contrainte mineure) et sub-horizontales, dans le secteur de la tombe de Ramsès II, avant le creusement de cette tombe. Il est donc licite de procéder ici à des modélisations fondées sur les hypothèses classiques en la matière.

## Lois de comportement

Les observations de terrain et les essais conduisent à considérer, au moins dans un premier temps, que les calcaires ont un comportement élastique linéaire.

Les lois de comportement des argilites, avant et après l'inondation, ont été modélisées par des relations affines entre tenseurs de contrainte et tenseurs de déformation, pour effectuer, en utilisant le logiciel CESAR-LCPC (Humbert, 1989), des calculs d'élasticité linéaire, avec contraintes initiales (voir ci-dessous). Dans ce cadre, les comportements des argilites sèches puis saturées, avec phénomène de gonflement au moment de l'imbibition, sont considérés, d'une part, en laboratoire, et, d'autre part, *in situ*.

### Comportement des argilites en laboratoire

À l'état sec, on pose :

$$\sigma = \Lambda(E_{\text{sec}}, \nu_{\text{sec}}) \cdot \varepsilon_1 \quad (1)$$

$\Lambda$  étant le tenseur d'élasticité isotrope associé au module d'Young  $E_{\text{sec}}$  et au coefficient de Poisson  $\nu_{\text{sec}}$  et  $\varepsilon_1$  le tenseur de déformation mesurée en laboratoire.

À saturation, on suppose que :

$$\sigma = \Lambda(E_{\text{sat}}, \nu_{\text{sat}}) \cdot \varepsilon_1 - P_g \cdot I \quad (2)$$

$\Lambda$  étant le tenseur d'élasticité associé au module d'élasticité  $E_{\text{sat}}$  (avec  $E_{\text{sec}} > E_{\text{sat}}$ ) et au coefficient de Poisson  $\nu_{\text{sat}}$ ,  $\varepsilon_1$  le tenseur de déformation mesurée en laboratoire,  $P_g$  la pression de gonflement à déformation nulle ( $P_g > 0$ ) et  $I$  le tenseur ( $3 \times 3$ ) unité (dans le cas d'un gonflement isotrope du matériau).

Dans ce cadre affine théorique, la valeur de  $P_g$  peut être estimée à partir des résultats des essais du LRPC d'Aix-en-Provence (fig. 7a). Au cours d'un tel essai, la pression de gonflement est déterminée de la manière suivante.

L'éprouvette d'argilite sèche est d'abord soumise à une compression œdométrique uniaxiale dont l'intensité est augmentée progressivement jusqu'à une valeur  $\sigma_{v,B}$  (ici : 1,48 MPa). D'après le modèle de l'équation (1), le point représentatif de l'échantillon parcourt, pendant cette phase, le segment OB, qui a pour équation :

$$\sigma_{o,v} = E_{o,\text{sec}} \cdot \varepsilon_{o,v}$$

$\sigma_{o,v}$  et  $\varepsilon_{o,v}$  étant respectivement la contrainte et la déformation verticales de l'essai œdométrique et  $E_{o,\text{sec}}$  le module œdométrique, qui est relié à  $E_{\text{sec}}$  et  $\nu_{\text{sec}}$  par la relation classique entre le module œdométrique ( $E_o$ ), le module d'Young ( $E$ ) et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) :

$$E_o = [E \cdot (1 - \nu)] / [(1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)]$$

L'argilite est ensuite imbibée d'eau sous la contrainte de compression constante  $\sigma_{o,v,B}$  et un gonflement d'intensité  $\varepsilon_{o,v,B,g}$  se produit. Le point représentatif de l'éprouvette suit alors une horizontale et s'arrête au point C, situé sur la droite œdométrique associée à l'équation (2). Soit  $\varepsilon_{o,v,B,g}$  la déformation de gonflement ; les coordonnées du point C sont :

$$\varepsilon_{o,v,C} = \varepsilon_{o,v,B} + \varepsilon_{o,v,B,g} ; \quad \varepsilon_{o,v,B} = \sigma_{o,v,B} / E_{o,\text{sec}} \quad \text{et} \quad \sigma_{o,v,B} = \sigma_{o,v,C}$$

Le point C est, d'autre part, situé sur le segment CD, qui a pour équation :

$$\sigma_{o,v} = E_{o,\text{sat}} \cdot \varepsilon_{o,v} - P_g,$$

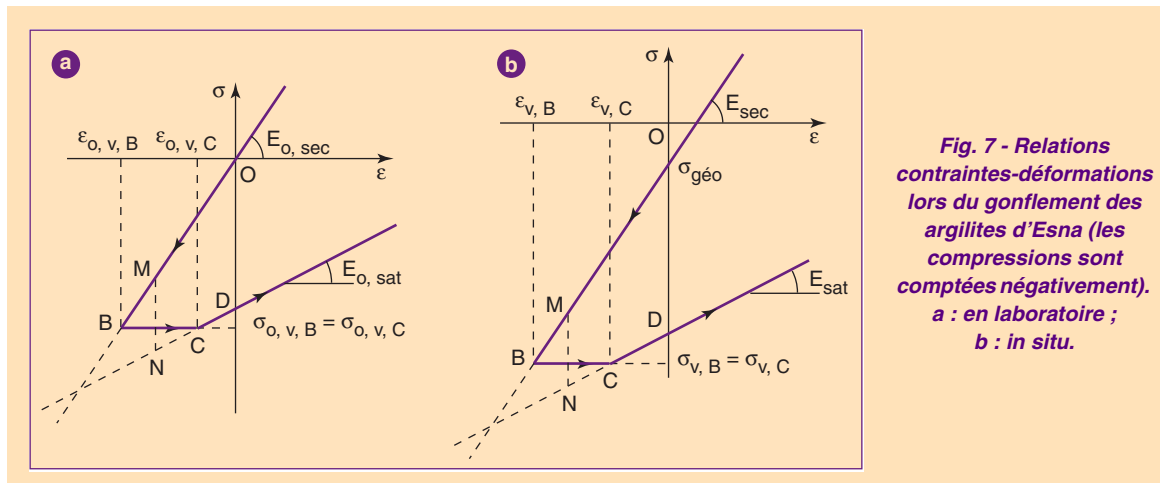
d'où :

$$\sigma_{o,v,C} = E_{o,\text{sat}} \cdot \varepsilon_{o,v,C} - P_g.$$

On en déduit :

$$\begin{aligned} P_g &= [E_{o,\text{sat}} \cdot ((\sigma_{o,v,B} / E_{o,\text{sec}}) + \varepsilon_{o,v,B,g})] - \sigma_{o,v,B} \\ &= [\sigma_{o,v,B} \cdot ((E_{o,\text{sat}} / E_{o,\text{sec}}) - 1)] + [E_{o,\text{sat}} \cdot \varepsilon_{o,v,B,g}] \end{aligned} \quad (3)$$

On notera que la modélisation adoptée rend compte de déformations de gonflement variables avec l'état de contrainte appliqué à l'œdomètre (fonction décroissante de l'intensité). De la même façon, elle rend compte de pressions de gonflement engendrées par l'imbibition à déformation constante (exemple : segment MN sur la fig. 7a), fonction décroissante de la déformation appliquée.



**Fig. 7 - Relations contraintes-déformations lors du gonflement des argilites d'Esna (les compressions sont comptées négativement). a : en laboratoire ; b : in situ.**

## Comportement des argilites *in situ*

Un changement d'origine (fig. 7b) permet de prendre en compte le poids du recouvrement de la tombe (contraintes géostatiques).

À sec, la loi de comportement *in situ* s'écrit :

$$\sigma = [\Lambda(E_{\text{sec}}, \nu_{\text{sec}}) \cdot \varepsilon] + \sigma_{\text{géo}} \quad (4)$$

$\sigma_{\text{géo}}$  étant le tenseur de contrainte géostatique au point considéré et  $\varepsilon$  la déformation *in situ*, qui est nulle pour  $\sigma = \sigma_{\text{géo}}$ .

Des équations (1) et (4), on tire :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon + [\Lambda^{-1}(E_{\text{sec}}, \nu_{\text{sec}}) \cdot \sigma_{\text{géo}}]$$

et la loi à saturation devient :

$$\sigma = [\Lambda(E_{\text{sat}}, \nu_{\text{sat}}) \cdot \varepsilon] + [\Lambda(E_{\text{sat}}, \nu_{\text{sat}}) \cdot \Lambda^{-1}(E_{\text{sec}}, \nu_{\text{sec}}) \cdot \sigma_{\text{géo}}] - (P_g \cdot I) \quad (5)$$

Les lois (4) et (5), de type élasticité linéaire avec contraintes initiales, sont traitées classiquement par le logiciel CESAR-LCPC au moyen de reprises de calculs, en agissant sur les propriétés des matériaux et à l'aide des mots-clés EFD (effet différé) et SIG (prise en compte de contraintes initiales) du module de chargement CHAR.

## Méthodologie – Phasage de la modélisation

Les modélisations s'appuient sur la méthode des « éléments finis », les hypothèses de base étant celles de la mécanique des milieux continus, qui supposent notamment l'homogénéité de chacun des éléments du modèle. Ces modèles ne correspondent pas totalement à la réalité, les roches étant plus ou moins hétérogènes et fragmentées ; mais cela n'est pas un handicap quand il s'agit d'analyser l'architecture de la tombe sur le plan conceptuel. La modélisation fournit en effet des indications intéressantes sur les zones dans lesquelles les limites de résistance des matériaux sont atteintes. Ces modélisations sont complétées par une étude du comportement des sols calcaires des salles en présence d'eau, fondée sur le calcul à la rupture.

### Phasage

Le logiciel CESAR-LCPC, qui permet de simuler l'évolution d'une structure en plusieurs phases successives, est adapté à l'étude de l'évolution polyphasée de l'hypogée de Ramsès II. La réaction de la structure a donc été modélisée en trois phases (colonne p du tableau I), chaque phase correspondant schématiquement à chacun des trois événements principaux (1, 6 et 7 du tableau I) et prenant en compte le champ de contrainte de la phase précédente.

L'état de contrainte après le creusement est engendré en une seule et première phase (événement 1), à partir du poids des roches de couverture et des coefficients de pression latérale des terres. Les contraintes initiales de cette phase sont les contraintes géostatiques qui régnaient au cœur du Plateau thébain avant le creusement de l'hypogée. En première approche, la teneur en eau initiale (avant creusement) des matériaux n'est pas, bien que non nulle, prise en considération.

La phase 2 de la modélisation correspond à l'inondation générale de la cavité (événement 6), qui provoque un abaissement des modules d'Young des deux roches et un gonflement des argilites sur 0,6 m d'épaisseur, les pressions de gonflement étant de 2 et 3 MPa respectivement dans les directions verticale et horizontales. Des modélisations complémentaires ont été réalisées avec d'autres paramètres de gonflement.

Le champ de contraintes supporté par l'enveloppe de la tombe après le creusement a été totalement modifié dès que l'eau a envahi la cavité (phase 2). Les contraintes ont été ensuite redistribuées lorsque des ruptures se sont produites dans cette enveloppe. Il est donc clair que les résultats obtenus grâce au modèle de la phase 2 ne peuvent concerner que les conséquences immédiates de la première inondation générale (événement 6) et que la simulation d'une troisième phase n'est, en principe, pas licite. Les observations de terrain et les expériences de laboratoire permettent cependant de compléter les résultats de la phase 2 : il est vraisemblable que plusieurs piliers (sinon tous) ont été ruinés dès la première inondation et que le gonflement des argilites s'est poursuivi ensuite pen-

dant longtemps (un gonflement à long terme est constaté expérimentalement). Une troisième phase a donc été prise en considération, en supposant que les piliers ont disparu à la fin de la deuxième phase, tandis que les argilites continuaient à gonfler, en engendrant une pression de gonflement verticale relativement faible (0,5 MPa). La prise en compte de cette troisième phase permet, notamment, d'illustrer le comportement des banquettes des salles à piliers ; elle peut être assimilée, arbitrairement, à la deuxième inondation générale de l'hypogée (événement 7).

### **Remarque : aspect réducteur du phasage**

Les essais en laboratoire ont montré que la pression et la déformation des argilites gonflantes augmentent d'abord très rapidement, puis lentement, pour se stabiliser ensuite autour de leurs maximums (voir par exemple : Wüst et Mc Lane, 2000). Or, les phases 2 et 3 de la modélisation prennent chacune en compte une pression de gonflement des argilites maximale immédiatement. Cette pression est, selon la verticale, de 2 MPa pour la phase 2, et de 0,5 MPa pour la phase 3 ; les procédures de calcul cumulent les intensités de ces pressions et leurs effets. Le phasage introduit donc des discontinuités artificielles, voire des artefacts, dans la représentation de phénomènes qui, en fait, évoluent continûment et pendant longtemps.

On atteint donc ici les limites d'une modélisation réalisée dans le cadre de la mécanique en statique, alors que les phénomènes réels n'ont pas été forcément synchrones dans le temps et l'espace. La simulation d'événements plus nombreux impliquerait cependant une approche méthodologique complexe et l'utilisation de procédures couplant différentes catégories de logiciels (inversion, traitement des discontinuités, modèles dynamiques, voire analyse factorielle). Des choix plus ou moins justifiés devraient alors être effectués sur la fracturation du massif calcaire et sur les propriétés des roches en cause (notamment sur les pressions de gonflement, qui devraient varier continûment dans le temps et l'espace). Mais le processus de ruine de la structure ne serait probablement pas connu, finalement, avec plus de certitude, et ces simulations n'apporteraient pas plus de renseignements sur la technicité des anciens égyptiens, ni sur la stabilité actuelle de la structure et les confortements à réaliser pour la sauvegarder.

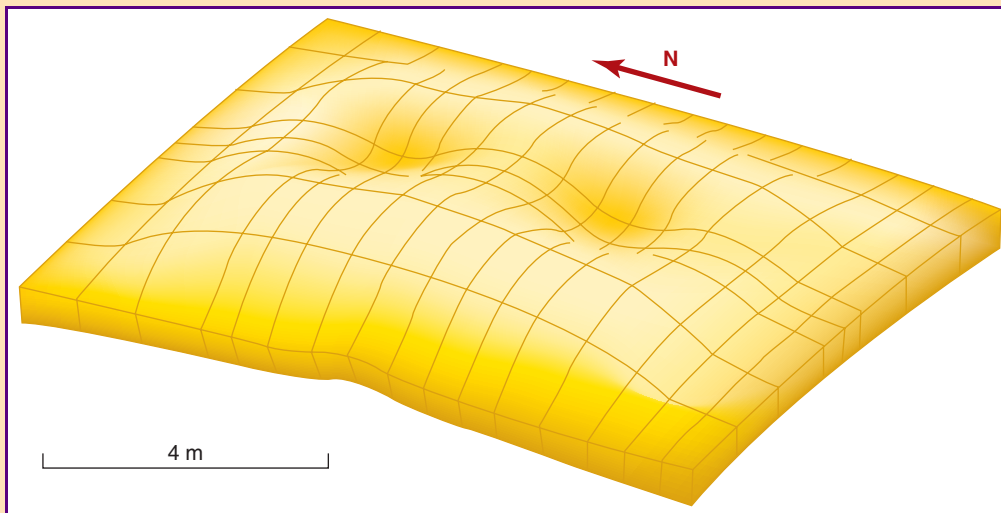
Malgré son aspect réducteur, la modélisation permet, couplée avec les observations, de détecter les premiers secteurs affectés par des ruptures quand l'hypogée a été envahi par l'eau : les secteurs ruinés sont effectivement ceux où la modélisation détecte des ruptures en phase 2.

## **Comportement d'ensemble – Mode d'analyse des résultats**

L'hypogée de Ramsès II est creusé dans des couches horizontales, à la limite de formations de rigidités très différentes, et une mince couche de calcaire a été réservée (fosse mise à part) pour former les sols des salles, initialement plats. On peut donc penser que cette couche a joué un rôle important dans le comportement de la structure. Les modèles montrent effectivement que, d'une manière générale, ce comportement a été dominé, dès le creusement (phase 1), par les réactions de cette couche aux charges géostatiques transmises par les piliers (fig. 8). Cette lame calcaire est assimilable à une dalle encastrée à ses extrémités (sauf pour celles des bas-côtés de la salle J, du côté de la fosse) ; elle travaille en flexion vers le haut dans ses zones libres de charge géostatique et vers le bas dans les zones chargées par les piliers. Symétriquement, les bancs de toit des salles travaillent en flexion vers le bas dans les zones libres. Quand les niveaux argileux gonflent (phases 2 et 3), les déformations et les contraintes sont accentuées.

Les contraintes intéressant les dalles calcaires des sols (et, symétriquement, les bancs de toit) doivent donc être analysées dans des secteurs particulièrement sensibles : d'une part au sol des zones libres des salles (extrados de la dalle bombée) et à l'interface calcaires/argilites sous les piliers, où s'exercent essentiellement des tractions, d'autre part sur le pourtour de chaque salle, dans le plan vertical séparant dalle du sol et murs ; dans ce plan, des tractions et, symétriquement, des compressions périmétriques s'exercent respectivement à la base et au sommet de la dalle. Les premières ruptures des sols se produisent au milieu des grands côtés des salles (portée maximale de la dalle calcaire).

Le dépouillement des résultats des modélisations a été effectué en analysant les contraintes et les déplacements (directions, sens, intensités) correspondant aux effets des différentes phases de l'évolution de la structure. Le critère de rupture de Mohr-Coulomb, bien adapté à l'étude des réactions des calcaires au cours de ces phases, a été utilisé systématiquement pour analyser la réponse de la cavité aux variations de son environnement.



**Fig. 8 - Exemple de déformation des dalles calcaires des sols soumises à des chargements variables : déformée du sol de la salle à piliers M (les amplitudes des déformations sont exagérées).**

Une attention particulière a été aussi portée aux valeurs maximales de la contrainte principale majeure ( $\sigma_1$  : traction) subie par ces roches, dont le seuil de résistance en traction est particulièrement bas à saturation (2 MPa, par essai brésilien). Remarquons cependant que l'on ne dispose, pour le moment, que d'essais uniaxiaux de résistance des calcaires, dont les résultats ne sont donc pas directement comparables à ceux des tests appliquant le critère de rupture, tridimensionnel, de Mohr-Coulomb.

Si les directions et les sens des déplacements calculés sont conformes à ceux que l'intuition attend du comportement d'une telle structure, leurs amplitudes sont très inférieures à celles observées sur le terrain (dans des rapports d'un à plusieurs dizaines ; voir plus loin). Notre intérêt a donc porté plus sur les sens et les valeurs relatives des déplacements que sur les valeurs absolues de ceux-ci. Le tableau III présente les principaux résultats des modélisations numériques concernant le modèle de référence.

### Comportement initial de la structure (phase 1 ; tableau III)

L'état de contrainte et de déformation de la tombe immédiatement après le creusement est, bien évidemment, inconnu ; depuis l'époque de Ramsès II, la structure a subi des agressions (plusieurs inondations ; voir plus haut) nombreuses et suffisantes pour que les effets du creusement ne puissent maintenant être identifiés avec certitude et mesurés. Mais rien n'empêche d'apprécier théoriquement, dans un premier temps et en utilisant ici le modèle de référence, le comportement initial et la qualité de la conception architecturale de la structure.

**Salle J :** les contraintes sont faibles dans la voûte (au centre de la salle :  $\sigma_2 = -0,7$  MPa,  $\sigma_3 = -1,2$  MPa) ; il est d'ailleurs significatif que celle-ci soit presque intacte quelque trente-deux siècles après Ramsès II. Le toit du bas-côté est incurvé vers le bas (petit bombement dirigé Nord-Sud : maximum de  $\sigma_1$  : 0,5 MPa). Dans la partie nord de ce toit, le secteur axé sur la porte de la salle M est souligné par des isolignes des contraintes majeures ( $\sigma_1$ ) dirigées Ouest-Est. À la face inférieure de l'architrave (entre les piliers), les intensités des contraintes  $\sigma_1$  (tractions) ne dépassent pas 1,7 MPa. On vérifie sans difficulté que les piliers n'ont pas tendance à flamber (au sens d'Euler). Un déséquilibre des contraintes verticales ( $\sigma_{zz}$ ) existe cependant au-dessus des piliers, dans les plans verticaux Ouest-Est (compression plus forte du côté de la fosse que du côté externe : écart  $\Delta\sigma_{zz} = 1,2$  MPa).

Les tractions ( $\sigma_1$ ) sont relativement fortes à la surface du sol dans la zone située entre la banquette orientale et les piliers ; là, elles atteignent 1,5 MPa et sont dirigées Ouest-Est (bombement dirigé Nord-Sud). Dans la partie nord du sol du bas-côté, on retrouve le même secteur dirigé Ouest-Est que

**TABLEAU III**

**Résultats des modélisations numériques (trois phases) du modèle de référence**

Phénomène	Creusement	Première inondation	Deuxième inondation
Phase	1	2	3
N° d'événement	1	6	7
Pg (MPa)	0	2 et 3	0,5 et 1,5
$\sigma_1$ : toit du bas-côté	0,5 (N-S)	0,5 (N-S)	0,2
$\sigma_1$ : architrave	1,4/1,7	2,2/2,6	0,4/0,2
$\sigma_{zz}$ : tête du pilier p4 : O	- 3,7	- 5,8	plus de piliers
$\sigma_{zz}$ : tête du pilier p4 : E	- 2,5	- 3,5	plus de piliers
Déplacement piliers de J	vers la fosse	vers la fosse	plus de piliers
$\sigma_1$ : sol du bas-côté	1,5 (N-S)	5,9 ; ruptures	6,2 au N ; ruptures
$\sigma_1$ : sol, Sud piliers de J	1,5/1,7	7/8,5 ; ruptures	6,1 ; ruptures
$\sigma_3$ : contact sol/pilier	- 2,9/- 3,3	- 3,8/- 4,5	sous place de p3 : - 18 (ruptures)
$\sigma_1$ : sous les piliers de J	1,3/1,5	6,9/8,2 ; ruptures	sous place de p3 : 12 (ruptures)
$\sigma_1$ : base du calcaire du sol du bas-côté	0,2	Périmétriques : N (2,6), E (5 ; ruptures)	Zones E, S, O : 6 (ruptures). Périmétriques : N (2,9), E (5,4 ; ruptures)
$\sigma_m$ fosse (p = 0,3 m)	- 0,4	- 1,7	- 2,4
$\sigma_m$ fosse (p = 0,6 m)	- 0,4	- 0,3	- 0,3
$\sigma_1$ : toit de M (Ouest)	0,6	0,6	0,6
Valeurs extrêmes de $\sigma_1$ et $\sigma_3$ au sol calcaire de la salle M	$\sigma_1$ : 1,3 Le long du bord ouest de la salle : $\sigma_3$ : - 7,2	$\sigma_1$ zones libres : N (5,4), E (8,4), S (4,2), O (7,3) ; ruptures. $\sigma_3$ aux bords des banquettes : N (- 9,6), E (- 7,7), S (- 10,2). Au bord ouest de la salle : $\sigma_3$ = - 19,3	$\sigma_1$ : zones E (4,5) et O (6,2 ; ruptures). $\sigma_3$ aux bords des banquettes : N (- 11), E (- 8,9), S (- 11,6). $\sigma_3$ le long du bord ouest de la salle : - 20
$\sigma_1$ à la base du calcaire du sol de la salle M (interface calcaire/argilites)	0,9 A l'aplomb du bord ouest de la salle : $\sigma_1$ : 1,2	A l'aplomb des bords de banquettes : N(4), E(2,9), S(4,4) : ruptures (NO et SO). Périmétriques : N(1,9), E (2), S (2,4) ; O (11,7 ; ruptures)	A l'aplomb des bords de banquettes : N (5,9), E (4,6) et S (6,4) ; ruptures, sauf dans les angles. Périmétriques : N (2,3), E (2,3), S (3) ; O (12,5 ; ruptures)
$\sigma_1$ : sous les piliers de M	0,5/0,7	6,5/7,1 (ruptures)	plus de piliers
$\sigma_m$ sous M (p = 0,8 m)	- 0,6	- 1,9	- 2,4
$\sigma_m$ sous M (p = 1,1 m)	- 0,7	- 0,7	- 0,4
$\sigma_1$ : toit de L	0,5	0,5	0,5
$\sigma_1$ : sol de L	1	1,2	1,3
$\sigma_m$ sous L (p = 1,4 m)	- 1,06	- 2,6	- 3,3
$\sigma_m$ sous L (p = 1,7 m)	- 1,1	- 1,7	- 1,7
Conv. (%) : Centre J	0,027	0,09	0,2
Conv. (%) : Ouest M	0,036	0,16	0,2
Conv. (%) : Centre L	0,021	0,03	0,03

Les conventions de signe pour la notation des contraintes principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) sont celles de la mécanique des milieux continus. Les intensités des contraintes sont en MPa. Pg : pressions de gonflement verticale et horizontales. Les orientations (N, E, S et O) sont conventionnelles (cf. fig. 3). Les intensités des contraintes  $\sigma_1$  sont des valeurs maximales ; celles indiquées pour l'architrave (surface inférieure) et le sol entre les piliers de la salle J concernent les zones situées au Sud des piliers p3 (à gauche dans la colonne) et p4 (à droite) ; les valeurs des contraintes  $\sigma_3$  et  $\sigma_1$  se rapportant aux piliers de la salle J, au sol et à l'interface calcaire/argilites (sous les piliers), concernent les piliers p3 (à gauche) et p4 (à droite) ; celles inscrites pour les piliers de la salle M concernent les piliers nord (à gauche) et sud (à droite).  $\sigma_{zz}$  : contrainte verticale en tête du pilier p4 dans le plan médian vertical Ouest-Est.  $\sigma_m$  : contraintes moyennes dans les argilites de la fosse (centre de la salle J), et dans les argilites supportant les salles M (secteur ouest de la salle) et L (centre de la salle) ; ces contraintes ont été relevées : - d'une part, au cœur de la couche gonflante, à des profondeurs (p) sous le niveau du sol, de 0,3 m pour la fosse, de 0,8 m pour la salle M, et de 1,4 m pour la salle L - d'autre part, au toit de la couche non gonflante, à des profondeurs (p) sous le niveau du sol, de 0,6 m pour la fosse, de 1,1 m pour la salle M et de 1,7 m pour la salle L. Conv. (%) : convergences maximales. Les ruptures signalées sont celles détectées en appliquant le critère de rupture de Mohr-Coulomb.

celui observé au toit. Entre les piliers, les tractions ( $\sigma_1$ ) atteignent 1,7 MPa au sol, où elles sont dirigées grossièrement Nord-Sud. Les piliers « poinçonnent » le sol calcaire, qu'ils compriment : la contrainte mineure ( $\sigma_3$ ) atteint au sol -2,9 MPa et -3,3 MPa aux centres des piliers p3 et p4 (ce dernier est relativement éloigné de l'angle nord-est de la salle). Symétriquement, les tractions ( $\sigma_1$ ) sont fortes à l'aplomb des piliers, à l'interface calcaires/argilites (1,3 MPa et 1,5 MPa, pour les piliers p3 et p4).

**Salle M** : la contrainte majeure ( $\sigma_1$ ) atteint 0,6 MPa en surface dans la partie ouest du toit de cette salle. Dans les zones libres de piliers et de banquettes, la dalle du sol supporte des tractions ( $\sigma_1$ ) maximales de 1,3 MPa. Ces contraintes sont dirigées perpendiculairement aux côtés de la salle et plus fortes dans les secteurs ouest et est que dans les secteurs nord et sud. Alors qu'elle n'est pas inférieure à -3,2 MPa au contact sol/piliers, la contrainte mineure  $\sigma_3$  (compression) atteint -7,2 MPa au sol, le long du bord ouest de la salle. À ces compressions élevées correspondent des tractions assez fortes à l'interface calcaires/argilites (maximum de  $\sigma_1$  de 1,2 MPa). À ce niveau, la dalle calcaire supporte des tractions de 0,5 MPa et 0,7 MPa à l'aplomb des piliers nord et sud.

**Salle L** : le toit de cette salle montre un léger bombement vers le bas ; les tractions ne dépassent pas là 0,5 MPa. La dalle calcaire du sol, relativement épaisse (1,1 m), supporte de faibles contraintes (traction maximale de 1 MPa en surface).

**Comportement des argilites ; convergences** : dans les salles J et M, les argilites se déplacent vers les centres des salles. On remarquera le confinement relativement élevé de celles qui supportent la salle L : au cœur de la couche potentiellement gonflante, à 30 cm sous l'interface calcaires/argilites (épaisseur du calcaire du sol : 1,1 m), la contrainte moyenne ( $\sigma_m$ ) est de -1,06 MPa contre -0,4 MPa et -0,6 MPa respectivement sous la fosse (pas de couverture calcaire) et la salle M (couverture calcaire épaisse de 0,5 m).

Les convergences maximales sont de l'ordre du centième de millimètre en valeur absolue. Celles intéressant l'annexe M (zone ouest de cette salle) sont plus fortes (maximum de 0,036 %) que celles intéressant les salles J (au centre de la salle : 0,027 %) et, évidemment, L (0,021 % au centre de la salle).

**Conclusion** : dans les trois salles, les contraintes ne dépassent pas les limites de résistance du calcaire et aucune rupture n'est détectée dans les salles. La chambre sépulcrale était donc globalement stable après l'excavation, sous réserve, cependant, que le contraste entre les modules d'Young des calcaires et des niveaux argileux d'Esna (essentiellement, pour ceux-ci, le niveau d'argilites d'Esna terminal) n'ait pas été excessivement élevé. Des modélisations intéressant les grandes annexes Q1 et Q2 ont conduit aux mêmes conclusions (Guillaume, 2002). L'hypogée avait donc, dans l'ensemble, été correctement conçu sur le plan architectonique. Cependant, les contraintes verticales étaient déséquilibrées au-dessus des piliers de la salle J et la situation du bas-côté nord-ouest, à structure géologique particulière (pilier calcaire p2 appuyé sur les argilites), était très précaire (Guillaume, 2003). Rappelons enfin que les parois argileuses de la fosse avaient été colmatées et certains éléments calcaires de la tombe réparés dès l'époque pharaonique (Évrard et Guillaume, 1997).

## Comportement après les inondations (phases 2 et 3)

La modélisation de la structure inondée a été effectuée en deux étapes (phases 2 et 3 des tableaux), pour le modèle de référence. Des modèles complémentaires concernent des maillages de la salle M seule et de l'ensemble constitué par les salles J et O.

### Modèle de référence : salle J (quart nord-est) et annexes L et M

#### Phase 2 (tableau III)

Sur la base d'observations faites dans la fosse et des essais du LRPC d'Aix, on considère que la première inondation générale (événement 6) provoque un abaissement des modules d'Young des matériaux et un gonflement des argilites sur une épaisseur de 0,6 m, en engendrant des pressions de 2 MPa et 3 MPa, respectivement dans les directions verticale et horizontales. Ce gonflement provoque une augmentation considérable des contraintes dans les secteurs sensibles des salles.

**Salle J** : à la surface inférieure des architraves, les contraintes principales majeures ( $\sigma_1$  : tractions), dirigées Nord-Sud, augmentent de 50 % relativement aux valeurs qu'elles atteignaient pour la phase 1 et le calcaire est près de se rompre. Les tractions varient très peu au toit du bas-côté de la salle J ; leur zone d'intensité maximale reste là dirigée Nord-Sud.

Les contraintes  $\sigma_1$  sont quadruplées au sol du bas-côté, où elles provoquent des ruptures (fig. 9A). Aux contacts entre le sol et les piliers, les contraintes principales mineures ( $\sigma_3$  : compressions) passent à  $-3,8$  MPa (centre de p3 ; + 31 %) et à  $-4,5$  MPa (centre de p4 ; + 36 %) ; symétriquement, à l'interface calcaires/argilites, les tractions ( $\sigma_1$ ) sous les piliers sont quintuplées : elles atteignent  $6,9$  MPa (sous p3, contre  $1,3$  MPa pour la phase 1) et  $8,2$  MPa (p4, contre  $1,5$  MPa) et des ruptures se produisent à cet endroit (fig. 9B). La zone Ouest-Est, axée sur la porte de la salle M et déjà individualisée au creusement (phase 1), reste bien marquée au sol et à la base du calcaire. À ce dernier niveau, les tractions périmétriques maximales, qui étaient très faibles à sec (phase 1 :  $0,2$  MPa), passent à  $2,6$  MPa et  $5$  MPa (Nord et Est) ; elles sont dirigées perpendiculairement aux côtés de la salle et provoquent des ruptures sous le bord est de la pièce (fig. 9B).

Les piliers, qui « poinçonnent » les architraves, sont entraînés vers la fosse par leur substratum argileux et le déséquilibre Est-Ouest des contraintes verticales au-dessus de ces piliers est presque doublé (tableau III ; analyse détaillée in : Guillaume, 2003). Cependant, le modèle ne détecte pas de rupture dans les piliers, malgré le puissant bras de levier résultant de cet entraînement.

Au centre de la fosse, à  $0,3$  m de profondeur (cœur de la couche gonflante), l'intensité de la contrainte moyenne est quadruplée ( $-1,7$  MPa), alors qu'elle change peu au toit de la couche non gonflante (à  $0,6$  m de profondeur). La convergence triple au centre de la salle.

**Annexes** : Les tractions sont fortes au sol de la salle M dans les zones libres de piliers et de banquettes ; dans tous ces secteurs, leurs intensités initiales (phase 1) sont multipliées par 4 à 6 et des ruptures sont détectées (fig. 10A). De fortes compressions affectent le sol à la limite des banquettes ( $\sigma_3$  : de  $-7,7$  à  $-10,2$  MPa), ainsi qu'au bord ouest de la salle, où  $\sigma_3$  est presque triplée ( $-19,3$  MPa). Sous les piliers de cette annexe, les tractions sont décuplées et provoquent des ruptures à l'interface calcaires/argilites (fig. 10B). À ce niveau, les tractions ( $\sigma_1$ ) périmétriques maximales, dirigées perpendiculairement aux côtés de la salle, sont au minimum doublées sous les bords est, nord et sud de la pièce ; elles sont presque décuplées sous le bord ouest : là, les plus élevées ( $11$  à  $12$  MPa, contre  $1,2$  MPa pour la phase 1) sont observées de part et d'autre de la porte (elles ne sont que de  $3,8$  MPa à l'aplomb de la porte elle-même). Le calcaire se déchire sous le bord ouest ainsi que, dans les secteurs nord-ouest et sud-ouest de la salle, à l'aplomb des bords des banquettes.

Les argilites supportant la salle M se déplacent vers le centre de la pièce. Sous la partie ouest de la pièce, face à la porte, la contrainte moyenne ( $\sigma_m$ ) au cœur du niveau gonflant est plus que triplée ( $-1,9$  MPa) ; elle ne change pas notablement au toit de la couche non gonflante. La convergence maximale est quintuplée dans la partie ouest de cette annexe.

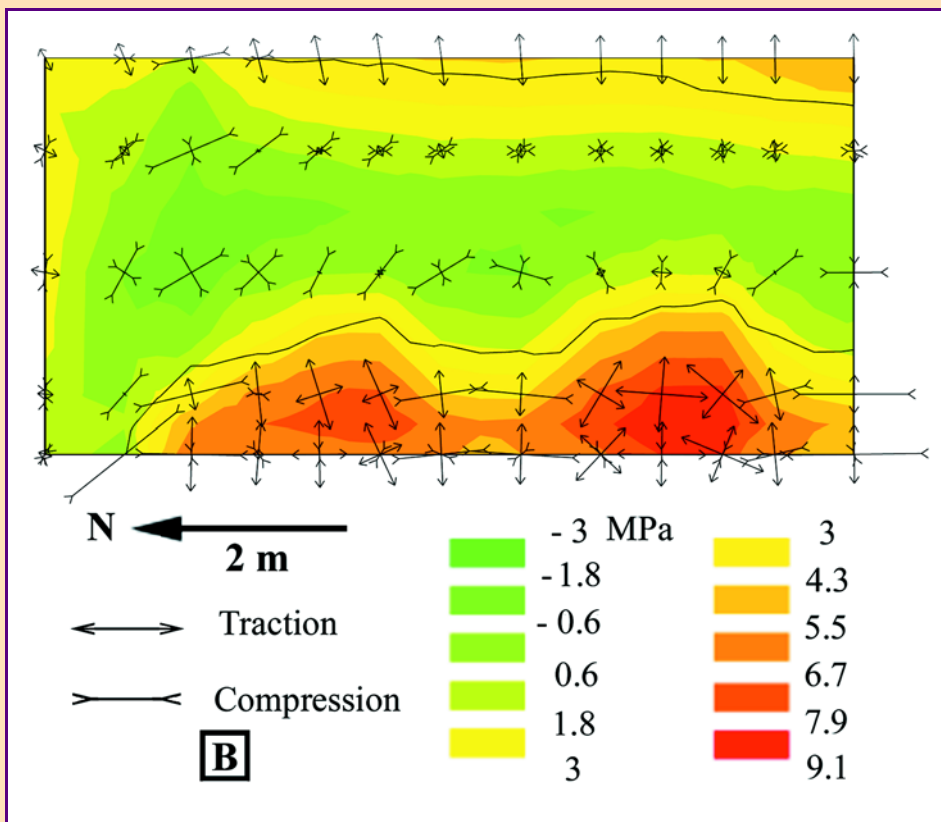
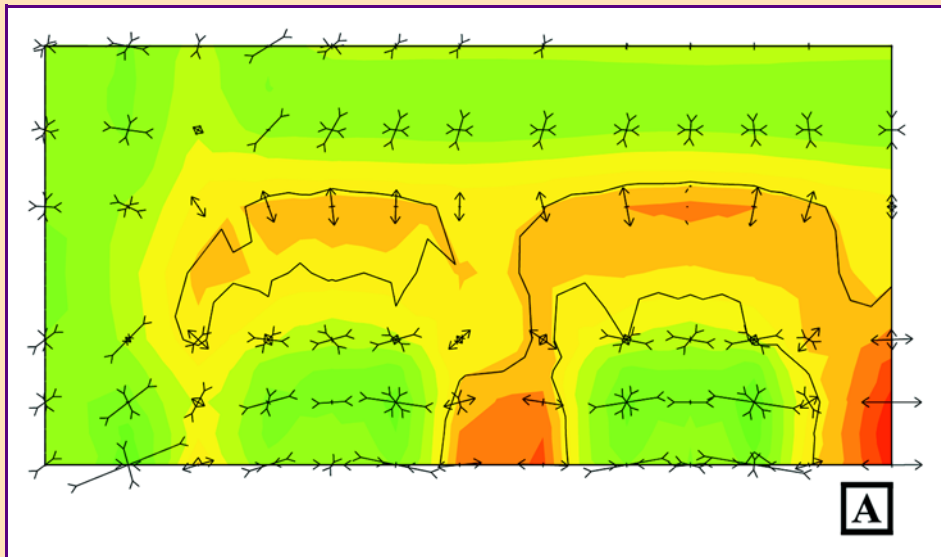
À la surface de la dalle calcaire de la salle L (épaisse de  $1,1$  m), les tractions augmentent de 20 % et la convergence maximale croît de 50 % au centre de cette salle. Au cœur de la couche gonflante, la contrainte  $\sigma_m$  est plus que doublée ( $-2,6$  MPa) ; elle augmente d'environ 50 % au toit de la couche non gonflante ( $-1,7$  MPa). Aucune rupture n'est détectée dans cette pièce.

### **Variantes de la phase 2**

D'autres modélisations, variantes de celle qui vient d'être décrite, ont été réalisées à partir du même maillage (modèle de référence), pour des valeurs plus fortes des pressions ou des épaisseurs de gonflement des argilites (fig. 11). Les effets des augmentations concernent essentiellement les piliers et les dalles calcaires des sols (bas-côté de la salle J et salle M ; le sol de la salle L, relativement épais, est peu affecté) ; dans ces éléments, les contraintes sont plus élevées et les zones de ruptures plus étendues ; la ruine de la structure est alors quasiment complète dès la phase 2 (événement 6).

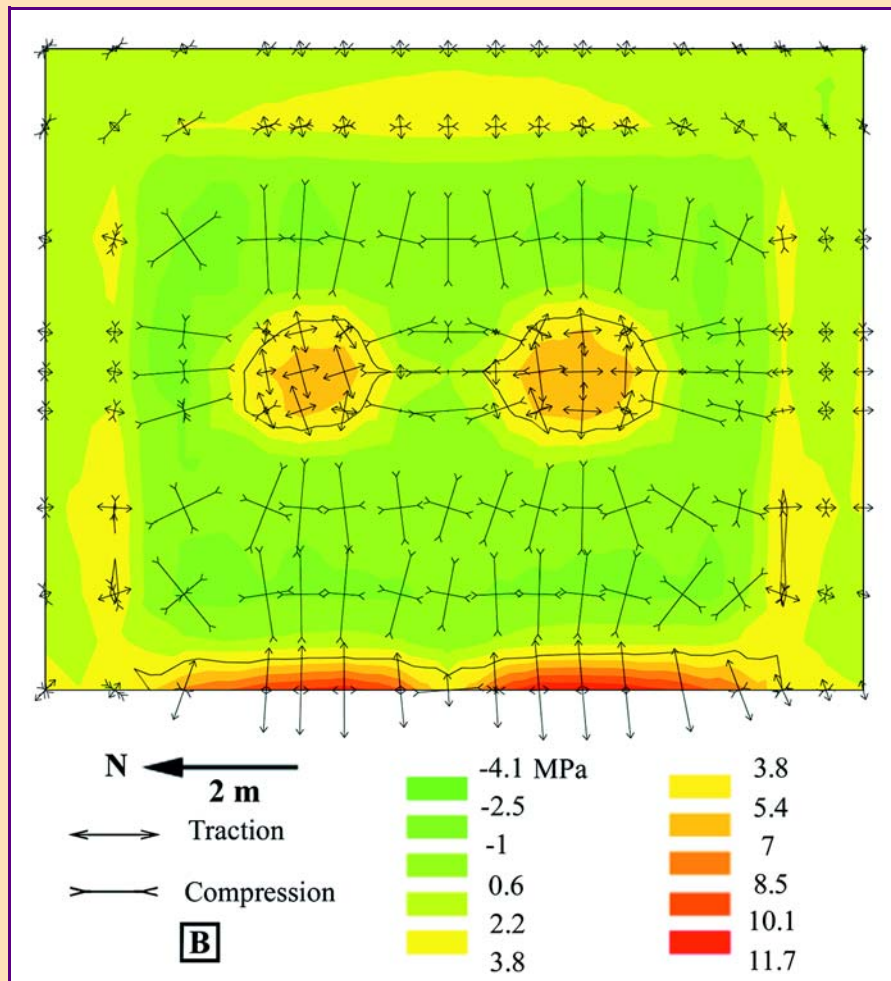
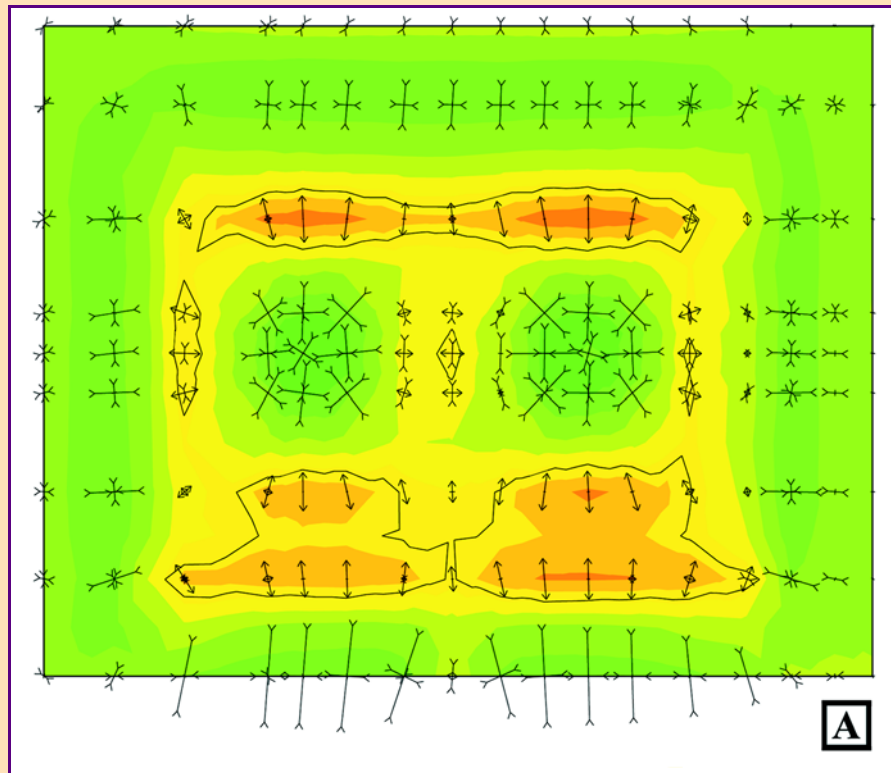
Pour une épaisseur de gonflement de  $1,4$  m sous la salle M seule (barres b fig. 11), ou pour une pression de gonflement verticale de  $4$  MPa sous les trois salles (barres c de la fig. 11), des ruptures se produisent au sol, par compression, le long du bord ouest de la salle M et à la base du calcaire (par traction) sur les autres côtés. Dans le premier cas, seuls les piliers de la salle M sont ruinés. Dans les deux cas, le calcaire du sol de la salle M se rompt devant les banquettes et les angles des banquettes proches des fronts de taille ne sont pas fracturés au ras des parois, ce qui est conforme à l'observation.



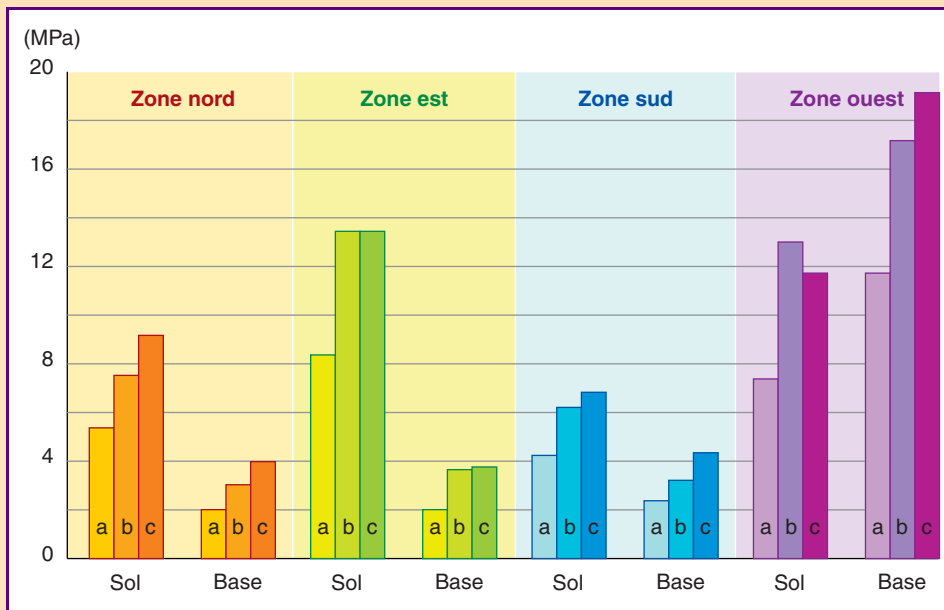


**Fig. 9 - Bas-côté oriental de la salle J : partie nord de la dalle calcaire du sol, vue de dessus. Phase 2 : intensité de la contrainte principale majeure ( $\sigma_1$ , en MPa) et directions des contraintes principales (nœuds sommets ; longueur du segment proportionnelle à l'intensité de la contrainte). Les zones où les tractions  $\sigma_1$  sont maximales et où des ruptures sont détectées (critère de Mohr-Coulomb) sont délimitées en noir. A : sol ; B : interface calcaires/argilites.**

Divers essais ont montré que la pression de gonflement verticale des argilites ne doit guère dépasser 2,5 à 3 MPa sous la salle J et ses petites annexes pour que, conformément à l'observation, le sol de ces dernières reste quasiment intact et que le sol du bas-côté ne soit ruiné qu'entre les piliers. En effet, quand la pression de gonflement verticale est de 4 MPa sous les trois salles, non seulement tous les piliers se rompent, mais ce sol est totalement disloqué. Il paraît d'autre part peu vraisemblable



**Fig. 10 - Dalle calcaire du sol de la salle M, vue de dessus. Phase 2 : intensité de la contrainte principale majeure ( $\sigma_1$ , en MPa) et directions de quelques contraintes principales (nœuds sommets). Les zones où les tractions  $\sigma_1$  sont maximales et où des ruptures sont détectées (critère de Mohr-Coulomb) sont délimitées en noir. A : sol ; B : interface calcaires/argillites.**



**Fig. 11 - Comportement de la dalle calcaire du sol de la salle M en fonction des caractéristiques du gonflement des argilites sous-jacentes. Maximum de la contrainte principale majeure ( $\sigma_1$ , en MPa) au sol dans les zones libres de piliers et de banquettes (notation, pour chaque zone géographique : « sol ») et périmétriques à la base du calcaire (notation, pour chaque zone géographique : « base »). a : phase 2 ci-dessus (tableau III) ; niveau gonflant épais de 0,6 m ; pressions de gonflement verticale et horizontales : 2 et 3 MPa. b : niveau gonflant épais de 1,4 m ; pressions de gonflement verticale et horizontales : 2 et 3 MPa. c : niveau gonflant épais de 0,6 m ; pressions de gonflement verticale et horizontales : 4 et 6 MPa.**

ble que les argilites de la salle M aient pu, sous leur couverture calcaire, être imprégnées rapidement sur une épaisseur de 1,4 m.

En conclusion, il est possible de rendre compte de plusieurs observations faites dans les grandes annexes en augmentant les pressions de gonflement des argilites seulement sous la salle M (4 MPa), pour une épaisseur du niveau gonflant de 0,6 m. Ce résultat recoupe celui obtenu par une modélisation réalisée sur un ensemble formé par les salles J et N (petite annexe dont le sol est épais d'une cinquantaine de centimètres) : pour une épaisseur de la couche gonflante de 0,6 m, la pression de gonflement ne doit en effet pas dépasser 3 MPa pour que le sol de la pièce N reste intact (Guillaume, 2001-2002). Le calcul à la rupture (voir plus loin) conduit au même résultat.

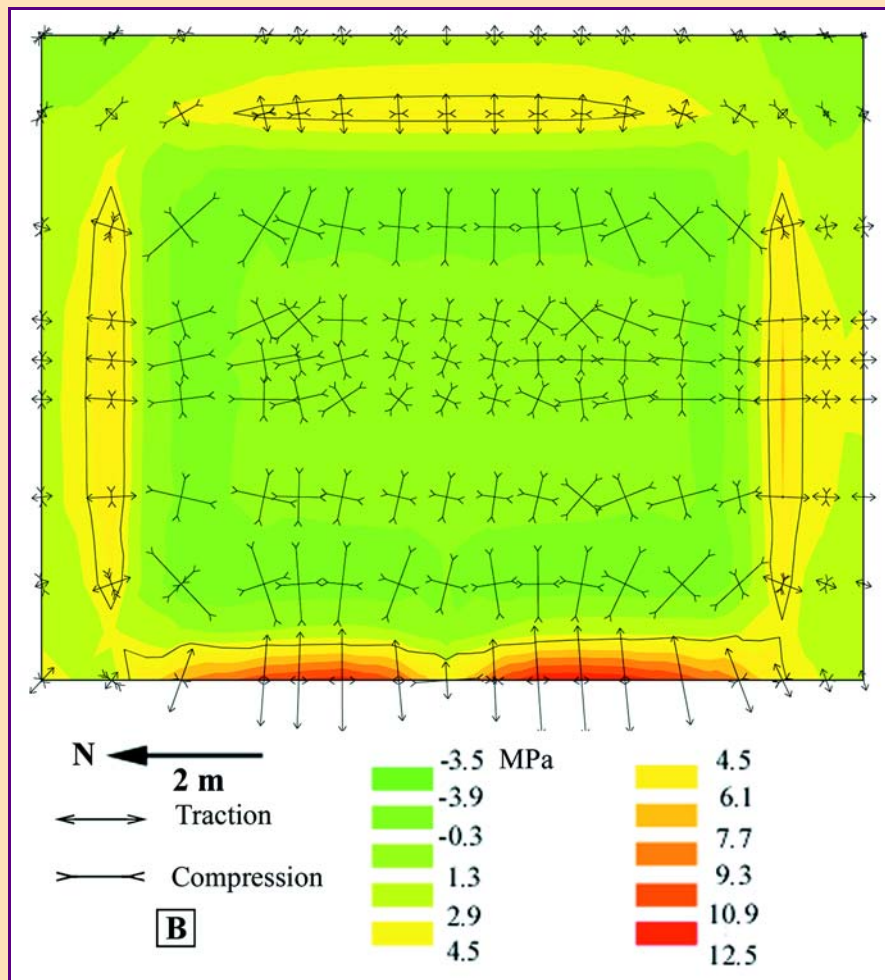
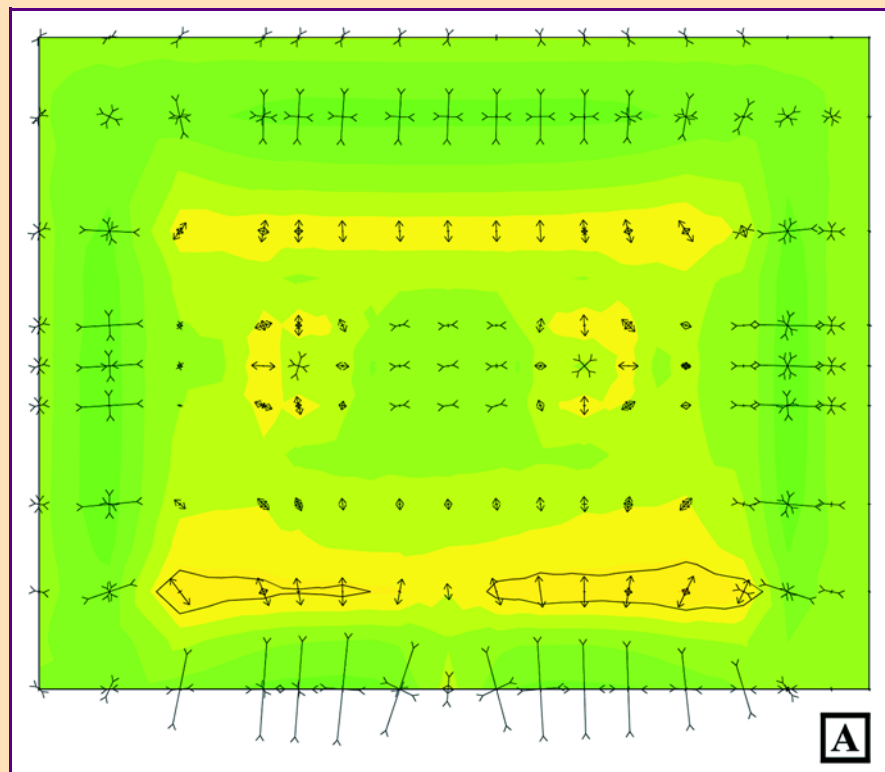
### Phase 3 (tableau III)

Il est supposé que cette phase commence alors que les architraves de la salle J et les piliers des salles J et M ont disparu (fin de la phase 2), et que les argilites gonflent encore en engendrant des pressions de 0,5 et 1,5 MPa (verticalement et horizontalement).

**Salles J et L :** le sol du bas-côté, qui n'est plus maintenu par les piliers, est soulevé, tordu et se disloque. Des compressions fortes ( $\sigma_1$  : - 2,7 MPa ;  $\sigma_3$  : - 18 MPa) sont engendrées à l'emplacement du pilier p3. Une zone de tractions ( $\sigma_1$  : 4,5 à 6,2 MPa) accompagnées de ruptures prend la dalle calcaire en écharpe. La structure Ouest-Est centrée sur la porte de la salle M est encore bien marquée (bombement anticlinal, avec des tractions au sol de 3,7 MPa à 6,2 MPa). À l'interface calcaires/argilites, le calcaire est soumis à de fortes tractions (jusqu'à 12 MPa) sous l'emplacement du pilier p3 et il se rompt. Dans la partie sud, les tractions atteignent 6 MPa au niveau de cette interface et la rupture est générale ; le calcaire se déchire à l'aplomb du bord est du bas-côté, où les tractions atteignent 5,4 MPa.

Les argilites se déplacent toujours vers le centre de la salle J et la convergence au centre de cette salle double.

Au centre de la fosse, à 0,3 m de profondeur (cœur de la couche gonflante), l'intensité de la contrainte moyenne ( $\sigma_m$ ) passe à - 2,4 MPa (+ 41 %). À l'aplomb du même point, à 0,6 m de profondeur (toit de la couche non gonflante), cette intensité varie peu.



**Fig. 12 - Dalle calcaire du sol de la salle M, vue de dessus. Phase 3 : intensité de la contrainte principale majeure ( $\sigma_1$ , en MPa) et directions de quelques contraintes principales (nœuds sommets). Les zones où les tractions  $\sigma_1$  sont maximales et où des ruptures sont détectées (critère de Mohr-Coulomb) sont délimitées en noir.  
 A : sol ; B : interface calcaires/argillites.**

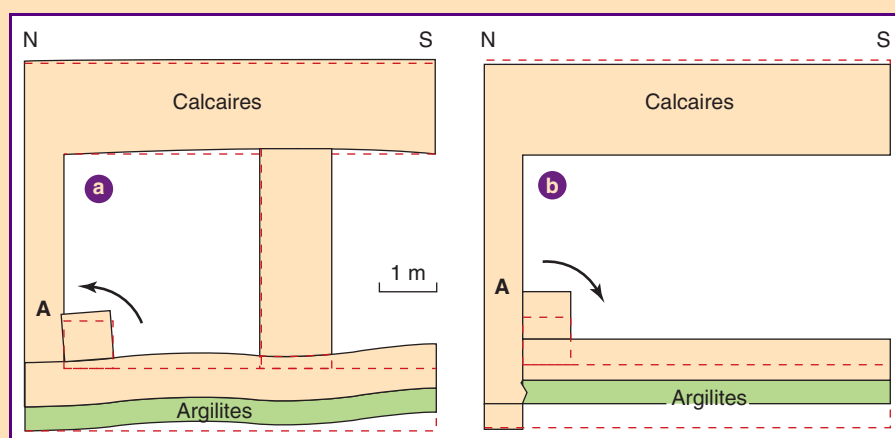
Dans la salle L, les tractions au sol et la convergence changent peu. Sous le centre de cette salle, la contrainte  $\sigma_m$  augmente de 27 % au cœur des argilites gonflantes (-3,3 MPa).

**Salle M :** les tractions ( $\sigma_1$ ) maximales au sol (fig. 12A) diminuent (relativement à celles de la phase 2) dans les parties est (4,5 MPa ; -46 %) et ouest (6,2 MPa ; -15 %) de cette salle. Les compressions au sol augmentent d'environ 15 % le long des bords des banquettes nord et sud et de seulement 4 % le long du bord ouest de la pièce ( $\sigma_3$  : -20 MPa, contre -19,3 MPa). À l'interface calcaires/argilites (fig. 12B), les tractions augmentent, à l'aplomb des bords des banquettes, de 45 % (banquette sud) à 59 % (banquette est). Les tractions périmétriques à ce même niveau augmentent de 7 % (bord ouest) à 25 % (bord sud). Des ruptures se produisent au sol dans la partie ouest et, à la base du calcaire, aux aplombs des bords des banquettes et du côté ouest de la salle.

Les argilites supportant cette annexe se déplacent toujours vers le centre de la pièce, et la convergence augmente de 25 % dans la partie ouest de la salle. Au cœur du niveau gonflant, la contrainte  $\sigma_m$  augmente d'environ 25 % (-2,4 MPa contre -1,9 MPa), et chute d'environ 40 % au toit de la couche non gonflante.

Le rôle des déchirures périmétriques du calcaire à l'interface calcaires/argilites est montré par la modélisation, dans les mêmes conditions que précédemment, d'un maillage tridimensionnel de la salle M comportant des surfaces de discontinuité verticales (éléments de contact) entre, d'une part, les parois de la salle, et, d'autre part, le sol et les banquettes. Quand ces ensembles peuvent se comporter indépendamment (glissement libre en phase 3 le long des discontinuités), le soulèvement vertical du sol près de l'entrée de la salle est multiplié par au moins 3,4 (relativement à ce même soulèvement quand les déplacements le long de ces surfaces sont bloqués), alors que ce facteur multiplicatif n'est que de 1,5 à l'intérieur de la pièce.

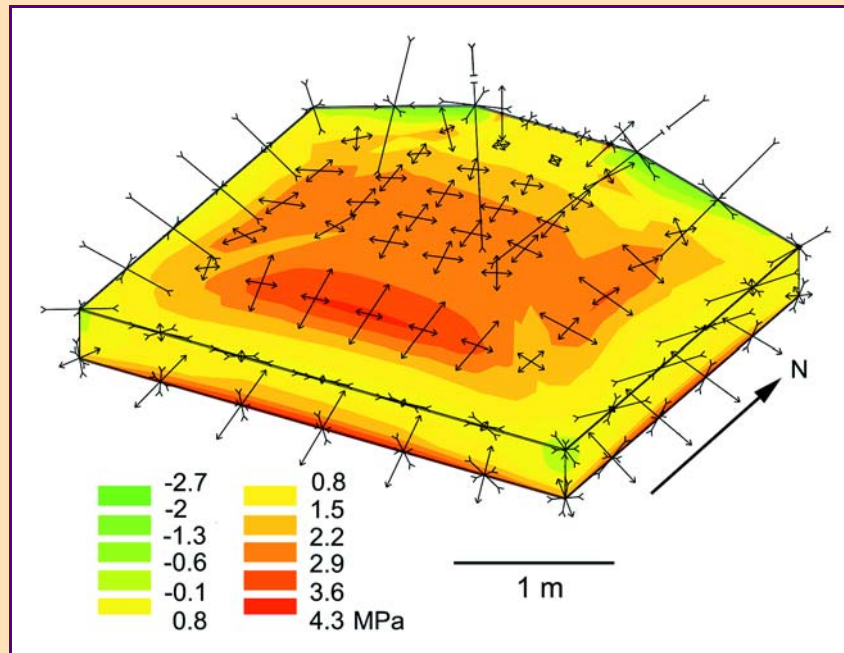
Des coupes Nord-Sud illustrent ce comportement : dans un premier temps (fig. 13a ; phase 2), la banquette bascule vers le Nord (ici, dans le sens antihoraire) ; après la rupture des piliers, elle tourne avec son substratum dans l'autre sens (point A de la fig. 13b ; phase 3) et s'écarte de la paroi (pour le modèle étudié : d'une dizaine de centimètres) ; l'observation montre que les sommets des banquettes sont effectivement écartés des murs, sans traces de frottement (du moins dans les parties visibles).



**Fig. 13 - Coupe verticale nord-sud à travers la partie nord de la salle M. Modèle bidimensionnel avec éléments de contact dans le plan vertical séparant d'une part la paroi nord de la salle, d'autre part la dalle du sol et la banquette. Déformations à la suite des inondations (en tiretés : position initiale du contour). a : phase 2 (avec éléments de contact bloqués) : avant ruptures du pilier et au pourtour de la dalle du sol ; b : phase 3 (avec glissement libre au niveau des éléments de contact) : après ruptures du pilier et au pourtour de la dalle du sol.**

## Modèle constitué par les salles J et O

Pour tester différentes hypothèses concernant la structure initiale de la salle O, l'évolution de cette pièce dans le cadre de l'ensemble qu'elle forme avec la partie sud de la salle J a été analysée. Le maillage construit pour cet ensemble permet de simuler un passage relativement progressif entre les calcaires et les argilites, et de faire varier l'épaisseur du sol calcaire de la salle O entre 0,3 m sur les bords et 0,6 m à l'entrée et au centre de la pièce.



**Fig. 14 - Ensemble des salles J (partie sud) et O, après l'inondation (phase 2) : contrainte principale majeure ( $\sigma_1$  : tractions, en MPa : zones d'isovaleurs) et directions des contraintes principales (en quelques nœuds sommets) sur les faces de la dalle calcaire, d'épaisseur variable, formant le sol de la salle O.**

Après le creusement (phase 1), la contrainte  $\sigma_1$  au sol de la salle O est, au plus, de 1,4 MPa (avec des gradients horizontaux relativement forts) aux abords de l'entrée. La contrainte moyenne au sommet des argilites est de -0,9 MPa au centre de la salle.

Quand l'eau envahit la pièce (phase 2 ; fig. 14), le gonflement des argilites fait passer la traction ( $\sigma_1$ ) maximale au sol à 2,4 MPa de part et d'autre de l'entrée, et à 2,7 à 2,9 MPa dans les secteurs est et ouest. Cette contrainte atteint 3,7 MPa dans la partie sud de la salle, devant la statue d'Osiris.

À l'interface calcaires/argilites, les tractions périmétriques (pourtour de la salle) dans le calcaire, qui n'étaient que de quelques dixièmes de MPa après le creusement, atteignent localement 4 MPa ; à ce niveau, elles provoquent des ruptures locales du calcaire (à l'aplomb du milieu du bord sud de la pièce). Sous le calcaire, l'intensité de la contrainte moyenne au toit des argilites est doublée (- 1,9 MPa).

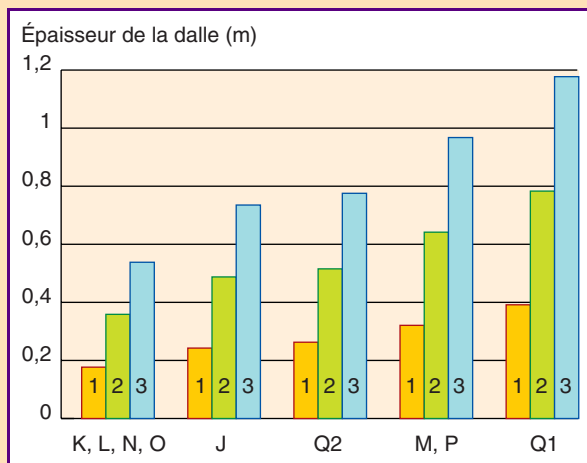
La modélisation ne détecte donc pas de destruction totale du sol calcaire de la salle après l'inondation. On notera que l'application d'une pression verticale de gonflement supérieure à 3 MPa provoque la fracturation générale non seulement du sol de la salle O, mais aussi celle du sol de l'annexe voisine (salle N), ce qui est contraire à l'observation.

### Calcul à la rupture du comportement des sols calcaires inondés

L'observation montre que les dalles calcaires formant les sols des petites salles annexes de la chambre sépulcrale de Ramsès II sont presque intactes alors que celles des grandes annexes ont été ruinées à la suite du gonflement des argilites. De même, les dalles calcaires des sols des bas-côtés de la salle J ne sont pas totalement disloquées entre les piliers et les banquettes. Les réactions de ces dalles, qui sont assimilables à des plaques à bords encastrés (celles des bas-côtés ne le sont pas totalement), peuvent être étudiées grâce à un calcul à la rupture (Salençon, 1983). Quand les argilites gonflent, la face inférieure d'une dalle est soumise à une pression uniformément répartie (en première approximation), verticale et dirigée de bas en haut. Des forces de cisaillement périmétriques ( $F_p$ ) et des forces de surface ( $F_s$ ) s'exercent alors sur la dalle :

$$F_s = S.P \text{ et } F_p = Per.e.\tau$$

S et Per étant respectivement la surface et le périmètre de la salle, e l'épaisseur de la dalle calcaire du sol, P la pression verticale et  $\tau$  la contrainte de cisaillement.



**Fig. 15 - Épaisseur minimale des dalles calcaires des sols supportant sans dommages des contraintes verticales de 1, 2 ou 3 MPa (indiquées sur le graphique) appliquées uniformément sur leur face inférieure (calcul à la rupture).**

À la limite de rupture du calcaire, ces forces sont égales, et la contrainte de cisaillement correspondante ( $\tau_{lim}$ ) est la résistance interne du calcaire au cisaillement :

$$\tau_{lim} = Rc / [2 \cdot \text{tg}(\pi/4 + \varphi/2)] \text{ (selon le critère de Mohr-Coulomb).}$$

Rc, résistance à la compression uniaxiale, et  $\varphi$ , angle de frottement interne du calcaire, sont deux quantités déterminées expérimentalement.

Il est donc possible de calculer, pour une salle donnée, l'épaisseur minimale de la dalle calcaire de sol pouvant supporter sans dommage une contrainte verticale d'intensité connue, assimilable en première approximation à la pression de gonflement verticale des argilites. Réciproquement, la valeur maximale de la contrainte verticale que peut supporter sans dommage une dalle de sol d'épaisseur fixée peut être calculée. Une telle approche a l'avantage de ne nécessiter fondamentalement aucune hypothèse sur les propriétés, l'épaisseur et le comportement de la couche gonflante.

La figure 15 présente, pour un calcaire saturé d'eau, les épaisseurs limites ainsi trouvées pour les annexes et le bas-côté oriental de la salle J : les dalles des petites salles (y compris celle de la salle O) étaient suffisamment épaisses pour supporter une contrainte verticale de près de 3 MPa, alors que l'épaisseur du calcaire aurait dû atteindre 1,2 m dans la salle Q1 pour supporter une telle contrainte (trop grand élancement). Les piliers des salles J, M, P et Q2 renforçant la résistance de la dalle calcaire à la poussée des argilites, les seuils d'épaisseur trouvés pour ces salles sont intermédiaires entre ces deux extrêmes.

## Ruine de la structure et évolution ultérieure

Les données archéologiques montrent qu'une douzaine de siècles, au moins, s'est écoulée entre le creusement de la tombe et les inondations. Des fluages et des réajustements locaux se sont donc produits pendant ce temps, engendrant quelques désordres dans un hypogée dont l'enveloppe rocheuse avait déjà été réparée par endroits (parois de la fosse ; paroi nord ; banquettes des annexes) à l'époque de Ramsès II. C'est donc un ensemble déjà dégradé localement, mais cependant globalement stable, qui a subi les attaques des éléments naturels qui ont provoqué sa ruine. Le début de ce processus de ruine peut être décrit qualitativement, pour les parties basses de la tombe, à partir des observations faites sur le terrain, des essais géotechniques et des modélisations dont les principaux résultats viennent d'être présentés.

### Chambre sépulcrale (salle J)

#### **Bas-côtés et piliers**

De fortes tractions s'exerçaient, par « construction », sur les sols calcaires des bas-côtés entre les piliers, à l'interface calcaire/argilites dans les zones situées sous les piliers, et à la base des architra-

ves. Ces secteurs ont donc été ruinés très rapidement, dès l'arrivée de l'eau (des blocs de calcaire local jalonnaient le contact entre les colluvions et leur substratum). De plus, l'observation et les modèles montrent que les masses des bas-côtés ont entraîné les piliers vers la fosse (décalage de plusieurs décimètres relativement aux architraves), engendrant ainsi un puissant effet de levier sur le haut des piliers et en accentuant le déséquilibre des contraintes verticales qui existait auparavant à ce niveau (Guillaume, 2003). Bien que le modèle ne détecte pas de rupture en tête des piliers, on peut penser que la progression du front de capillarité vers le haut (non modélisée ici) a provoqué, dans ces secteurs chargés, des effondrements de pores (Maury et al., 1996) dont les effets se sont cumulés avec ceux de ce levier, engendrant des ruptures au niveau des architraves. Tous ces phénomènes ont finalement conduit très rapidement à la destruction complète des architraves, des têtes des piliers et des bords de la fosse.

Les sols calcaires situés devant les banquettes des bas-côtés sont seulement affectés par des ondulations à grand rayon de courbure et fracturés en *opus incertum* (à la manière de la déformation de radiers en moellons), notamment à la faveur de cassures anciennes. Par contre, le calcaire est très disloqué sur les bords de la fosse. Cette différence nous paraît significative : si la ruine des piliers et des architraves était essentiellement due au gonflement des argilites, les dalles calcaires des bas-côtés seraient elles aussi complètement ruinées, ce qui n'est pas le cas.

La déformation en accent circonflexe (de 28 cm de flèche maximale et dirigée Ouest-Est) qui intéresse le sol du bas-côté nord-est est un cas particulier : elle affecte un secteur soumis, par construction (présence de la salle L et de la porte de la salle M), à des contraintes relativement élevées.

Les comportements différents des piliers p8 et p6 et de leur substratum argileux doivent être soulignés : le pilier p8 est resté presque en place, alors que, au contraire, le pilier p6 s'est enfoncé (relativement) d'une trentaine de centimètres dans son substratum, comme un emporte-pièce. Ces piliers supportaient, par construction, des charges (dues à la voûte) très voisines ; situé près d'un angle de la salle, le pilier p6 était même soumis à une charge un peu inférieure à celle agissant sur le pilier p8. Le confinement des argilites étant pratiquement le même sous les deux piliers, une telle différence de comportement de ces deux secteurs de la tombe suggère, si l'on admet que les têtes des deux piliers étaient également solides, que les propriétés des niveaux argileux variaient latéralement. Cette hypothèse est confortée par la relative conservation des fines structures (lits sédimentaires et petites diaclases anciennes suturées par de la calcite) des argilites sous et au voisinage du pilier p8.

Les banquettes réservées dans la masse calcaire ont certainement joué un rôle important dans l'évolution des bas-côtés en se comportant, dans un premier temps, comme des coins de renfort. Après la ruine des piliers, les ruptures détectées dans le calcaire en phase 2, à l'interface calcaires/argilites, le long des parois de la salle, ont été accentuées (comme l'illustre la phase 3 de la modélisation) par des basculements de panneaux de dalle calcaire sous la poussée des argilites gonflantes (avec effet de bras de levier). Les banquettes ont alors pu être détachées des parois et décrochées vers le haut, souvent le long des cassures anciennes qui hachent la paroi est de la salle.

Enfin, le bas-côté nord-ouest de la salle J était instable par construction, puisque constitué par des argilites supportant un pilier calcaire (p2). Sa ruine s'est donc certainement produite dès le début de l'inondation ; peut-être même a-t-elle amorcé celle de l'ensemble de la salle (Guillaume, 2003).

### **Fosse**

Les parois argileuses de la fosse sont en mauvais état et les parties des escaliers taillées dans les argilites et reliant les bas-côtés à la fosse ont disparu. L'histoire de ces éléments s'est sans doute confondue avec celle de l'ensemble des bas-côtés.

Les argilites de la fosse étaient protégées par du mortier qui a retardé leur contact avec l'eau. Il est donc probable que leur gonflement a été légèrement décalé dans le temps, relativement aux phénomènes affectant les bas-côtés. Ce gonflement a déformé le sol de la fosse, qui montrait, avant qu'il ne soit plus ou moins nivelé par les fouilleurs, des ondulations de rayon de courbure variable. Des structures témoignent des fortes contraintes latérales subies par les argilites de la fosse : – plongement vers l'Est des argilites (pli en genou dirigé Nord-Sud) sous le pilier p4 – débit en plaquettes à surface moirée de la partie supérieure des argilites, qui a été engendré par les cisaillements subis pendant le gonflement (formation de plis sub-microscopiques dans les minéraux argileux) – plis décimétriques affectant les argilites dans la cavité des canopes, qui ont intéressé un matériau devenu



très plastique et dont l'expansion horizontale était bloquée sous les parois voisines (la forme de l'un d'eux évoque celle d'une figure de flambement) ; quand ces plis se sont formés, une (ou des) surface de décollement horizontale est née dans les argilites, sous la zone plissée, à la base de la couche gonflante (à 60-70 cm de profondeur, au-dessus du banc de calcaire marneux, resté intact ; fig. 5). Souignons, sur un plan général, que ces plis illustrent, même s'ils intéressent des argilites, un des très rares exemples de déformations souples et permanentes produites naturellement dans des roches superficielles, à notre échelle de temps.

## Antichambre et annexes K, L et N

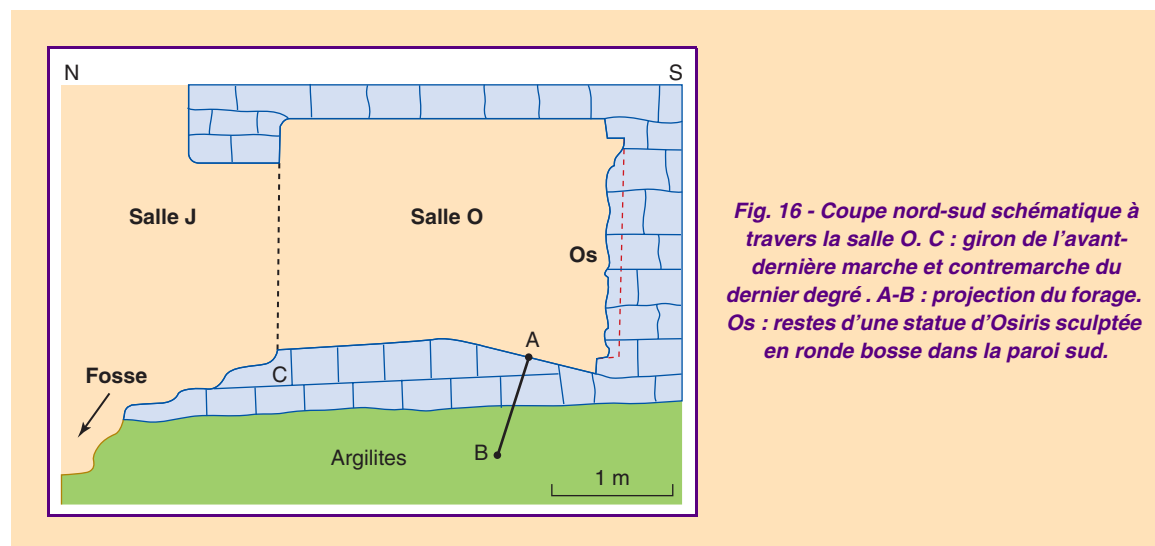
Le calcaire formant une partie du sol de l'antichambre (salle I) n'a pas complètement éclaté à la suite de l'inondation ; on peut en déduire que, compte tenu de la taille de la salle, son épaisseur, qui ne peut être évaluée précisément, atteint probablement au moins un mètre.

Les venues d'eau ont eu relativement peu d'effet sur les salles K, L et N : petits décollements aux toits et aux sols, fracturations, souvent le long de cassures anciennes, des parois mitoyennes de la salle J, trop minces par « construction ». Les sols calcaires des petites salles (K, L, N) sont en relativement bon état : ils ne sont que légèrement déformés (plasticité macroscopique ; flèches verticales de l'ordre du centimètre) et fracturés. Comme le montre aussi le calcul à la rupture, les dimensions de ces annexes n'étaient pas suffisantes pour que les portées des dalles calcaires de leur sol dépassent un seuil au-delà duquel le calcaire aurait été fortement endommagé à la suite du gonflement des argilites. De plus, l'épaisseur relativement grande du sol calcaire de la salle L (1,1 m au lieu de 0,5 m) renforçait la stabilité de cette salle.

## Annexe O

Pour expliquer l'origine de la forme bombée du sol de cette annexe, il faut tenir compte des données suivantes :

- des observations faites avant que les desquamations superficielles du sol calcaire n'aient été colmatées par les restaurateurs, ainsi qu'un forage avec carottage (fig. 16), ont montré que la fine cassure verticale (diaclyse ou faille à rejet millimétrique) qui affecte le sol, les parois et le toit de la salle, et qui a été suturée par de la calcite bien avant l'époque pharaonique, est intacte et non déformée en profondeur dans le sol. Cet accident n'a donc pas joué depuis l'époque pharaonique. Ce comportement du sol tranche avec celui des sols des grandes annexes, souvent éclatés le long de cassures anciennes, ouvertes, sous la poussée des argilites gonflantes ;
- aucun cisaillement majeur pouvant témoigner d'une montée du sol ou d'une descente des parois (est, sud, ouest) n'est visible sur le pourtour de la salle et le toit de celle-ci, sub-horizontale, n'est pas ruiné ; les restes du mortier qui revêtait initialement le sol remontent encore, sans discontinuité, le long des parois ;



- la surface verticale la plus haute de l'escalier d'accès à la pièce est une contremarche taillée dans le calcaire et non un miroir de faille ; le giron de l'avant-dernier degré est, encore maintenant, partiellement visible (C fig. 16). À l'époque de Ramsès II, il ne fallait donc pas, en arrivant en haut de l'escalier, descendre une (voire deux) marches (dont on ne trouve d'ailleurs pas de trace) pour pénétrer dans la salle. L'escalier lui-même est peu endommagé. La petite faille Nord-Sud, à rejet centimétrique et à pendage Est, qui affecte le haut de l'escalier et prend en écharpe le sol calcaire de la partie ouest de la salle (la partie orientale du sol était encore masquée par des colluvions en 2000), nous paraît être un des rares témoins de la poussée des argilites ;
- le forage (trace A-B fig. 16) a montré que l'épaisseur de la dalle calcaire du sol est, à l'aplomb du centre de la salle, d'une bonne cinquantaine de centimètres (comme dans la banquette sud de la fosse, dans l'annexe N, dans les bas-côtés de la salle J et dans les grandes annexes) et que le calcaire repose sur les argilites d'Esna sans discontinuité.

Il est par ailleurs possible, en utilisant des paramètres raisonnables, de réaliser des modélisations numériques du comportement de la salle O, dont les résultats sont compatibles avec les observations, et le calcul à la rupture conduit à la même conclusion (§ « Calcul à la rupture du comportement des sols calcaires inondés » ; p. 36). L'observation et l'expérience montrent, de plus, que les calcaires sont fragiles (pas de plastification notable ni de perte d'énergie au cours des cycles « charge-décharge » des essais : Sablon, 1994). Il ressort d'ailleurs de travaux effectués depuis quelques décennies sur les propriétés mécaniques des géomatériaux que de tels calcaires ne peuvent se déformer plastiquement et rapidement que dans des conditions de température et de pression équivalant à celles régnant à plusieurs kilomètres de profondeur dans la croûte terrestre, et non dans l'étage tectonique superficiel. Une plastification généralisée ne peut en effet affecter de telles roches en très peu de temps que sous des contraintes moyennes bien supérieures à celles qui ont pu naître là pendant le creusement ou la ruine de la tombe.

La dalle calcaire formant le sol de la salle O a supporté la poussée des argilites gonflantes ; elle n'est pas ruinée et ne s'est pas déformée plastiquement dans son ensemble. La forme du sol de cette pièce résulte donc de la taille du calcaire par les artisans.

### **Salle M et autres grandes annexes (P, Q1 et Q2)**

Les argilites situées sous les grandes annexes, très peu confinées, ont gonflé presque librement et soulevé aisément les sols calcaires, dont ils ont provoqué la fracturation le long de cassures correspondant souvent à la réactivation d'accidents sub-verticaux pré-pharaoniques. Ces accidents anciens se relaient en coulisse du Nord au Sud et, pour la plupart, intéressent également les toits des salles ; mais ils sont restés intacts dans ces toits. D'autres fractures, du même type mais dirigées Ouest-Est, interfèrent avec les précédentes, déterminant ainsi des panneaux de sol relativement indépendants. À l'intérieur de ces panneaux, les adaptations du calcaire aux déformations des argilites sous-jacentes se sont effectuées grâce à la fissuration de la roche. D'autre part, les modélisations mettent clairement en évidence le rôle de coins de renfort joué, dans un premier temps, par les banquettes (voir aussi, sur l'exemple de la salle Q2 : Guillaume, 2002).

Les essais de laboratoire (Serratrice, 1998 ; Wüst et Mc Lane, 2000 ; Guillaume et al., 2001) ont montré que le gonflement des argilites et la montée en pression correspondante sont très rapides. La ruine des sols et des piliers s'est donc produite tôt, pendant le dépôt des colluvions c1/d1 (événement 6, phase 2 de la modélisation). Comme les sédiments d2 ont nivelé les reliefs des sols des annexes (événement 7) et englobé les parties inférieures des piliers, qui sont restées relativement intactes, l'intervalle de temps séparant les deux événements 6 (dépôt d1 dans la fosse et érosion des mortiers de sol dans les annexes) et 7 (dépôt d2) a dû être court.

### **Discussion : modélisation des grandes annexes et réalité**

L'étude du modèle de référence et le calcul à la rupture montrent que l'éclatement du calcaire des sols des annexes M, P (par raison de symétrie), Q1 et Q2 (par analogie), est dû au trop grand élanement des dalles calcaires formant ces sols.

Toutefois, comme c'est le cas pour la salle J, la modélisation des grandes annexes, avec une couche gonflante épaisse de 0,6 m et une pression de gonflement verticale de 2 MPa, ne détecte pas des ruptures en tête des piliers ; de plus et surtout, elle ne rend pas complètement compte des amplitudes

des soulèvements observés dans ces salles, qui sont plus de dix fois supérieures à celles des déplacements calculés pour les phases 2 et 3 (§ « Comportement après les inondations » ; p. 29, et tableau III ; p. 28).

L'étude paramétrique dont les résultats ont été résumés plus haut (§ « Variantes de la phase 2 », p. 30) montre que la limite de rupture des piliers est atteinte, dans la salle M, quand la pression de gonflement verticale des argilites est relativement élevée (4 MPa, au lieu de 2 MPa). Dans ce cas, des ruptures se produisent aussi dans la dalle calcaire du sol, à la périphérie de la salle, ce qui rend compte des observations. Cependant, les dénivellations du sol calculées ne sont toujours pas du même ordre de grandeur que les soulèvements observés. Pour qu'elles le soient, les modélisations doivent prendre en compte, dans le cadre de l'élasticité, des pressions (ou/et des épaisseurs) de gonflement très fortes (plusieurs dizaines de MPa ou/et plusieurs mètres) ou/et des modules d'Young des argilites très faibles (10 à 20 MPa, pour obtenir un écart très fort entre les modules des argilites et des calcaires). Mais, dans ce cas, les modèles calculés ne rendent pas compte des observations faites dans d'autres secteurs de la tombe : les sols des petites annexes et des bas-côtés sont alors complètement détruits. Certes, les modèles concernent des matériaux idéaux (homogènes et non pré-fracturés), mais l'hypogée a été creusé dans des niveaux argileux raides et des calcaires très massifs, dont les cassures étaient bien suturées. D'autres facteurs, à effets potentiellement cumulatifs, doivent donc être pris en considération ici pour expliquer le comportement particulier des dalles des sols des grandes salles. Dans la plupart des cas, la réponse de la structure ne peut cependant être modélisée précisément, puisque ces phénomènes, généralement rétro-agissants, ont certainement modifié considérablement le champ de contrainte.

### **Comportement des argilites**

Les plis intéressants les argilites de la fosse et les niveaux argileux (trouvés par forage dans la salle M) occupant les cœurs des « anticlinaux » formés par les sols des annexes montrent que les argilites gonflantes ont acquis des déformations permanentes. Il est donc probable qu'une modélisation réalisée en utilisant une loi de comportement des argilites mieux adaptée permettrait de rendre compte des déplacements observés, surtout si le modèle comportait des surfaces de discontinuité (éléments de contact ou disjoints) et si le logiciel permettait la prise en compte de grandes déformations.

Des fluages, non pris en compte par les modèles élastiques, ont donc pu jouer un rôle non négligeable dans la formation des structures observées. Des tassements verticaux de 10 à 20 cm d'amplitude se sont produits, relativement aux seuils des portes, sur les pourtours des salles. On peut trouver là une bonne partie du volume de argilites mobilisées par fluage, sans apports considérables provenant des zones situées sous les murs et les fronts de taille. Cependant, les déformations ont pu devenir permanentes, au moins en partie, à la suite de simples entrées d'air dans les argiles.

Les ruptures des dalles calcaires des sols et des piliers provoquées par le gonflement des argilites ont été accompagnées par une libération presque complète du gonflement. Cette libération a permis le développement de grandes déformations, le gonflement libre des argilites pouvant, au moins localement, atteindre 70 à 80 % (essais de Serratrice, 1998 et de Wüst et Mc Lane, 2000) : le gonflement d'une couche épaisse de 0,6 m peut, dans ces conditions, provoquer un soulèvement de près de 0,5 m. Réciproquement, il suffit d'un gonflement d'environ 36 % pour que le toit d'une couche gonflante épaisse de 1,4 m (épaisseur des argilites surmontant le banc de calcaire qui, sous les grandes annexes, prolonge celui observé dans la fosse : fig. 5) se soulève de 0,5 m. La poussée des argilites a donc pu induire des soulèvements de panneaux de sol atteignant plusieurs décimètres de flèche aux extrémités libres de ces panneaux.

Ces soulèvements ont vraisemblablement été accompagnés ou accentués par l'adaptation géométrique des dalles de sol due au gonflement du calcaire (par analogie avec le comportement de lames de parquet en bois mouillées). Ainsi, un gonflement du calcaire de 0,5 % (valeur vraisemblable, selon les données expérimentales) a pu induire, dans les salles M, P et Q1, un soulèvement de 0,4 m des extrémités libres des panneaux de sol.

### **Ruine des piliers par entraînement horizontal et rotations**

Les parties supérieures des piliers et les toits situés à leur aplomb sont détruits. Comme dans la salle J, des rotations ont pu se produire en haut des piliers, à la suite de petits déplacements latéraux affectant les panneaux du sol entraînés par les argilites et cumuler leurs actions avec celles des pous-

sées des argilites. Les piliers ont donc été rapidement ruinés par effet de levier à leur encastrement sommital. Le comportement du pilier nord de la salle P est remarquable : ce pilier a résisté plus longtemps que les autres et s'est d'abord enfoncé (relativement) dans son substratum.

### **Rôle des banquettes**

Comme celles de la salle J, les banquettes des annexes se sont d'abord opposées à la poussée des argilites gonflantes en jouant le rôle de coins de renfort pour les dalles calcaires des sols. Elles ont été ensuite poussées vers le haut, le long de décrochements dont l'ampleur est due aux soulèvements importants qui viennent d'être évoqués : comme dans la salle J, l'augmentation des tractions périmétriques causée (par effet de levier), à l'interface calcaire/argilites, par des basculements de panneaux de sol, a provoqué ou accentué des déchirures du calcaire au contact dalle/paroi, en arrière des banquettes ; en désolidarisant ainsi les banquettes des murs, ces ruptures ont elles-mêmes été suivies par un déconfinement et un gonflement presque libre des argilites ; le soulèvement et le décrochement des banquettes vers le haut ont donc été facilités. Finalement, les panneaux de sol ont légèrement basculé vers le centre de la salle en entraînant les banquettes, qui se sont alors écartées des murs (*cf.* fig. 13).

### **Autres causes de la ruine**

Les hypothèses admettant des variations latérales de la teneur en smectites des argilites, un épuisement du potentiel de gonflement de ces roches plus marqué sous la salle J que sous les grandes annexes et la stabilisation des minéraux argileux de la fosse par un mortier carbonaté, sont compatibles avec certaines observations et données expérimentales (Guillaume, 2001-2002).

## **Évolution ultérieure**

Une accalmie a succédé au dépôt du deuxième ensemble de sédiments (c2 et d2). Pendant cet intervalle de temps (événement 8 du tableau I), la surface de ces sédiments a séché et durci dans l'ensemble de la tombe. Une nouvelle venue d'eau a ensuite provoqué le dépôt d'un dernier ensemble de colluvions (e) dans les parties basses de l'hypogée et de nouveaux désordres dans une structure déjà très affectée par les inondations précédentes. L'observation montre que cette nouvelle inondation a eu des conséquences relativement limitées. On peut lui attribuer :

- dans les grandes annexes, le jeu (ou rejeu) en touches de piano des cassures Ouest-Est. Dans la salle Q1, une de ces cassures affecte le sol calcaire et le premier ensemble de colluvions (d2) ;
- le basculement de certains panneaux, délimités dans les dalles calcaires des sols par les fractures Nord-Sud et Ouest-Est, qui entraîne celui de restes de piliers ;
- les déformations à grand rayon de courbure et de faible amplitude qui intéressent la surface indurée, donc le substratum de l'ensemble (d2) de sédiments torrentiels déposés dans les grandes annexes ;
- l'accentuation locale de la fracturation et du soulèvement du sol (observée dans la partie nord-est de la salle M) et l'ouverture de cassures aux sols des salles ;
- le morcellement de certaines banquettes, dont des éléments sont tombés sur les colluvions sous-jacentes ;
- la possible rupture finale, par compression, du pilier nord de la salle P (fendu en deux verticalement, *cf.* illustration de la couverture).

Cette importance relativement faible des désordres dus à cette nouvelle période orageuse est explicable par l'épuisement du potentiel de gonflement des argilites après les premières inondations, épuisement constaté expérimentalement.

Des tassements se sont ensuite produits dans le secteur des salles J, M et P ; ils ont provoqué des désordres locaux, dont les traces les plus spectaculaires, déjà signalées par Curtis et Rutherford (1981), sont visibles dans les parois est et sud de la salle J (fractures horizontales). Il est significatif, à ce propos, que la cassure horizontale ancienne qui affecte le pilier p7 de la salle J et qui avait été rebouchée par les artisans pharaoniques, n'ait pas été rouverte, alors que le mur voisin montre une fracture béante sur plusieurs centimètres. Ces tassements peuvent être dus à un dégonflement des argilites ou/et résulter du déplacement d'ensemble (par fluage?) des bas-côtés vers la fosse. Ils ne peuvent être datés précisément : le gonflement lui-même est un phénomène doté d'une forte inertie (une expérience du LRPC, d'Aix-en-Provence a montré que le gonflement secondaire peut durer des

années), et les bas-côtés se déplacent vers la fosse sans doute encore actuellement ; certaines des cassures horizontales affectant le mur oriental de la salle J paraissent, en effet, très fraîches, et les tassements correspondants accentuent le décrochement vers le haut de la banquette qui faisait initialement corps avec ce mur. Ces phénomènes peuvent avoir commencé pendant l'intervalle de temps (à rapprocher de l'événement 8) séparant les dépôts des colluvions d2 et e.

Après le dépôt des colluvions e, plusieurs orages ont concerné la tombe, essentiellement dans ses parties hautes. De nouvelles colluvions se sont alors déposées dans les salles et les corridors supérieurs, l'accès des sédiments aux parties basses ayant été bouché, à la suite de la deuxième période orageuse, dans le couloir d'accès (au niveau de la salle F). Mais l'eau, plus ou moins filtrée, a pu quand même pénétrer jusque dans les parties inférieures de l'hypogée, déposer quelques nouveaux sédiments fins, ainsi qu'une mince pellicule argileuse sur les surfaces horizontales des fractures ouvertes et accentuer les désordres. Pendant les deux derniers siècles, les colluvions des orages ont régulièrement colmaté les tranchées ouvertes dans les sédiments torrentiels par les fouilleurs.

Le visiteur qui pénètre pour la première fois dans cet hypogée vieux de trente-deux siècles ressent une impression de stabilité. Mais cette impression, due à la plasticité macroscopique de la structure, à la présence de quelques tirants qui ancrent des blocs instables des toits et à des colmatages récents, est en réalité illusoire. L'examen détaillé de la cavité montre en effet que celle-ci n'est, en réalité, pas stable et évolue en permanence, comme en témoignent principalement :

- la fracturation et la ruine quasiment complète du mur mitoyen entre la salle J et les annexes M et P. Ce mur ne joue plus que localement son rôle de soutènement et un important arc de décharge Ouest-Est se développe au toit de l'ensemble des salles J et M. Perpendiculairement au premier, des arcs du même type naissent au droit des anciennes architraves ;
- la formation d'une cloche dans le toit de la salle M, favorisée par la présence d'enduits d'origine karstique insinués dans des joints sub-horizontaux des calcaires ;
- les décollements de toit au-dessus des bas-côtés et des grandes annexes, suivant un mécanisme décrit précédemment (portée trop grande ; Évrard et Guillaume, 1997) ; les blocs en déséquilibre, constitués par des calcaires affectés par du discage, ont dû être boulonnés ;
- la naissance d'aiguilles prismatiques instables dans la paroi nord de la salle J (interférences entre les plans de la paroi et des réseaux de cassures) ;
- le déplacement vers la fosse des bas-côtés et de parties des parois nord et sud de la salle J ; la dégradation des parois de la fosse ;
- l'impressionnante fermeture latérale de la cavité le long de nombreuses petites cassures horizontales affectant les calcaires, y compris ceux des fronts de taille. Il semble aussi que la convergence se soit accentuée dans la salle J depuis les mesures de Lepsius, vers 1840. Cet archéologue avait en effet relevé une hauteur sous voûte d'environ 6,5 m, alors que la hauteur actuelle est d'environ 6 m (valeur moyenne).

L'instabilité de la structure a été accentuée depuis que les colluvions qui remplissaient la cavité ont été enlevées et que la tombe a été largement ouverte (dégradation de la résistance du calcaire provoquée par les variations d'humidité et de température). Des réajustements, dont la dangerosité doit être soulignée, se produisent en permanence à la faveur de la fracturation intense du massif, dans l'enveloppe, en calcaires mécaniquement fatigués, de l'hypogée. Des cavités karstiques peuvent, de plus, exister dans l'enveloppe de la tombe et fragiliser celle-ci. Heureusement, il n'y a pas ici une nappe phréatique dont la présence pourrait aggraver la situation, notamment en facilitant un fluage important des roches.

La sauvegarde de l'hypogée nécessiterait un confortement complet et systématique de la couverture calcaire de la structure, pour qu'un effondrement d'ensemble de la tombe ne risque pas de se produire. Ce confortement général, dont un cahier des charges a été élaboré par H. Évrard (CETE de Lyon), est d'autant plus urgent que des fortes contraintes sont maintenant reportées sur les murs mitoyens, déjà très disloqués, et sur les parois fracturées des salles.

## Technicité des anciens Égyptiens et architecture

Les observations et les modélisations permettent de mieux apprécier le niveau des connaissances techniques des architectes de l'époque de Ramsès II.

## Implantation de la chambre sépulcrale

Les « directeurs de tous les travaux », qui maîtrisaient les techniques de la topométrie, connaissaient bien la position spatiale de l'interface entre calcaire thébain et argilites d'Esna. Il est par conséquent très vraisemblable que celui qui était en charge de la tombe de Ramsès II, s'appuyant sur des documents précis (Golvin, 2001), avait demandé au maître d'œuvre de l'époque de « viser » cette interface pour y implanter la chambre sépulcrale du roi. Dans ce cadre, la question est posée des raisons qui ont poussé Ramsès II, comme son père Séthi I, à faire creuser délibérément sa tombe à ce niveau et encastrer sa fosse dans les argilites.

L'architecte ne pouvait s'attendre, car rien ne le laissait soupçonner en surface, à trouver les roches d'Esna à un niveau relativement élevé, d'abord dans l'antichambre, puis à l'entrée de la chambre sépulcrale. Sachant que les exécutants des travaux bénéficiaient d'une certaine liberté quant aux dispositions précises des éléments des tombes, on peut supposer, après Maystre (1938), que le coude droit formé par le couloir d'accès (H sur la fig. 3) et l'antichambre (I) est dû à la présence de « roches de mauvaise qualité » (lanière d'argilites au sol de l'antichambre). Une question au moins aussi intéressante que la précédente est posée par l'écart d'environ 7,5 degrés entre la direction des corridors d'accès et celle de l'axe de la voûte sépulcrale (Rutherford, 1988 ; Weeks, 2000). En effet, les artisans auraient pu, quand ils ont commencé à creuser la chambre sépulcrale de Ramsès II (par le haut, comme habituellement), donner à l'axe de sa voûte la même direction que celle des corridors (le corridor d'accès à la chambre sépulcrale de Séthi I est bien constitué, lui, par deux segments parallèles). L'écart mesuré ici pourrait résulter d'une modification délibérée de direction à la suite de nouvelles visées astronomiques. À l'appui de cette hypothèse viendrait le fait que les axes majeurs de symétrie d'autres monuments construits par Ramsès II ou ses successeurs montrent de curieux changements d'orientation relativement à des constructions antérieures à Ramsès II. De même, le premier pylône et l'enceinte du Ramesseum sont obliques relativement au temple lui-même, qui intègre des structures plus anciennes. Le changement de repère s'effectuerait alors pendant le règne de Ramsès II. Cependant, cette question reste ouverte, car la précision des tables donnant la position des étoiles était alors d'environ 5 minutes, et les représentations graphiques, de type « horloges stellaires » des tombes ramessides, indiquaient des positions d'étoiles à  $\pm 7,5$  degrés autour de la culmination (Leitz, 1995). En tournant légèrement dans le sens horaire, les artisans n'avaient-ils donc pas, tout simplement, tenté d'éviter la nouvelle lanière d'argilites qu'ils venaient de mettre au jour dès l'entrée de la future chambre sépulcrale royale ?

L'architecte savait certainement qu'il devait faire réserver, au sol des salles, une dalle de calcaire suffisamment épaisse pour éviter une instabilité générale de la structure causée par le contact direct entre des piliers rigides et un substratum plastique. Les contraintes géométriques imposées par les positions de l'antichambre et de la salle J permettent d'expliquer pourquoi cette dalle calcaire a été, finalement, sous-dimensionnée en épaisseur. Par contre, une dalle d'épaisseur plus grande aurait pu être réservée au sol des annexes M et P, auxquelles on aurait alors accédé, depuis le bas-côté de la salle J, par un escalier. L'architecte était-il obligé d'assurer une continuité horizontale entre la salle J et ses grandes annexes ou ne savait-il pas dimensionner une dalle ? De toutes façons, l'épaisseur des sols calcaires des grandes salles aurait dû atteindre plusieurs mètres pour que la structure résiste aux inondations, comme l'ont montré des analyses paramétriques (Guillaume, 2001-2002, 2003).

En résumé, l'implantation spatiale de la chambre sépulcrale de Ramsès II s'est révélée être une erreur sur le plan géotechnique. Mais, contrairement à ce qui est observé dans d'autres cas, le sous-dimensionnement des dalles calcaires des bas-côtés de cette chambre n'est pas forcément d'origine conceptuelle, puisqu'il a été, en quelque sorte, imposé par la structure géologique, que les artisans n'ont découverte que tardivement. L'architecte semble avoir eu conscience des problèmes posés par les argiles gonflantes puisqu'il a fait appliquer sur les argilites de la fosse un mortier stabilisateur. Finalement, ce n'est sans doute pas par hasard que les tombes des successeurs de Ramsès II ont été creusées en pleine masse calcaire.

## Situations des salles O, M et P

La position de la salle O de la tombe de Ramsès II est originale : en effet, cette salle ne se trouve pas, comme les autres petites annexes, près d'un angle de la chambre sépulcrale ; de plus, son axe de symétrie Nord-Sud est décalé vers l'Est de plus d'un mètre par rapport à celui de la voûte (dis-

tance bien supérieure à la marge d'erreur de positionnement), sans raisons géologiques déterminantes. La statue d'Osiris sculptée dans sa paroi sud ne se trouve donc pas sur l'axe de symétrie majeur de la chambre sépulcrale. La position de la salle O est donc frappante, car, à une autre échelle, la situation de la statue rappelle celle de la sculpture du même type, placée en situation axiale dans la tombe des fils de Ramsès II (KV.5) et vers laquelle montent des rampes. On retrouve également une telle statue, en position haute, dans une tombe de l'Assassif (Tiradritti, 2001 et bibliographie). Celle de la salle O est en léger contrebas dans cette pièce, mais le visiteur doit monter pour arriver à son niveau : avec son sol taillé évoquant « l'île primordiale », elle se trouve, elle-aussi, en perspective ascendante.

La cavité des canopes, disposée axialement, aurait gêné l'accès à une salle O centrée. Mais cette cavité aurait pu être creusée plus à l'ouest, sans difficultés techniques particulières ; il semble donc que les constructeurs aient délibérément donné la priorité « spatiale » aux canopes plutôt qu'à la salle osiriaque. En tout état de cause, l'influence de la cavité de la salle O sur la stabilité d'ensemble de la chambre sépulcrale n'a pas été déterminante.

Le mur mitoyen entre la salle J et les grandes annexes M et P est mince (1,3 m) ; réservé dans la masse calcaire fracturée constituant l'enveloppe de la tombe, il a été totalement disloqué et sa ruine a sans doute entraîné celle de la partie ouest du mur séparant les salles M et P. De même, les murs réservés entre les petites annexes et la chambre sépulcrale étaient trop minces et sont maintenant plus ou moins fracturés. Plusieurs chambres sépulcrales voûtées de pharaons ramessides de la Vallée des Rois, dont le plan général est semblable à celui de la salle J, ont des petites annexes dont les murs mitoyens sont, eux aussi, trop minces. Mais les hypogées des successeurs de Mérenptah ne comportent pas de grandes annexes aussi proches de la chambre sépulcrale. Des désordres survenus précocement dans les tombes de Ramsès II et de Mérenptah avaient peut-être poussé les architectes à mieux disposer les annexes des tombes royales ultérieures.

## Rôle des banquettes

Il a été noté plus haut que les banquettes des grandes annexes M, P et Q2 avaient d'abord joué le rôle de coins de renfort quand les sols calcaires de ces salles ont été soumis aux poussées des argilites gonflantes. Quand ces banquettes sont absentes (côtés ouest des salles), les sols calcaires sont très disloqués. S'ils avaient voulu renforcer la structure, les concepteurs auraient pu réserver ces banquettes le long de tous les côtés des salles (portes mises à part). Ils ne l'ont pas fait ; ces éléments, « de mobilier », étaient donc seulement utilitaires et décoratifs.

## Conclusion

L'analyse architecturale quantitative de la chambre sépulcrale de Ramsès II montre que cette salle, située à la limite entre deux formations rocheuses de rigidités très différentes, aurait été assez stable à sec, sous réserve que ce contraste de rigidité n'ait pas été trop élevé. La présence de grandes salles annexes (M et P) et le sous-dimensionnement de leurs murs mitoyens fragilisaient la chambre sépulcrale.

Avec les observations *in situ* et les essais en laboratoire, la modélisation montre que la ruine de l'hypogée est principalement due à la chute, consécutive à l'inondation, de la résistance à la traction du calcaire formant l'enveloppe de la cavité. Le calcul à la rupture confirme les résultats des modélisations : les dalles calcaires des sols des petites annexes, faiblement élancées, ont résisté aux poussées des argilites ; celles des grandes salles, trop élancées, ne pouvaient supporter ces poussées. Des effondrements de pores dans les calcaires en tête de piliers, des effets de bras de levier sur les piliers et sur les dalles calcaires des sols et des adaptations géométriques des dalles fracturées ont certainement contribué à la ruine de l'hypogée.

Le manque de mesures réalisées *in situ* pose le problème de la validation des résultats des modélisations présentées ici. Cependant, les parties endommagées de la tombe à la suite des inondations sont celles dans lesquelles les modèles calculés en utilisant des paramètres mécaniques raisonnables détectent des tractions élevées et/ou des ruptures.

Il apparaît enfin que le sous-dimensionnement en épaisseur des murs mitoyens et des dalles de sol des grandes annexes, ainsi que l'absence de banquettes le long de certains parois, soient dues à des erreurs de conception plutôt qu'à des considérations mystiques.

---

**Remerciements.** Les travaux sur la tombe de Ramsès II n'auraient pu être entrepris et effectués sans les soutiens constants de Messieurs A. Bonnet, G. Pilot et D. Burgunder. Nous remercions également Madame H. Paquet, Messieurs J. Biarez, H. Évrard, P. Habib, P. Humbert et l'équipe de la section des modèles numériques du LCPC, A. Le Roux, Ph. Mestat, Ph. Reiffsteck, J. Rutherford, J.-Y. Sablon, J.-F. Serratrice, K. Weeks et R. Wüst pour leurs conseils, les informations qu'ils ont bien voulu nous communiquer et les fructueuses discussions que nous avons eues avec eux à propos de la tombe de Ramsès II et de la Vallée des Rois. Monsieur Ph. Mestat a bien voulu, de plus, procéder à une première lecture du manuscrit de cette note. Les mécénats de la Fondation Elf et de la Société Elf nous ont été aussi très précieux.

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- BOTHMER B., HAHN U., FAZZINI R., Report of the study to determine the feasibility of clearing, conserving, and recording the tomb of Ramesses II in the Valley of the Kings and a proposal for future work in this tomb, *Brooklyn Museum*, 1 brochure, **1975**, 55 pages (inédit).
- CÔTE P., DEROBERT X., GUILLAUME A., Auscultations radar dans la tombe de Ramsès II, *Memnonia*, VII, **1996**, pp. 157-162.
- CURTIS G., RUTHERFORD J., Expansive shale damage, Theban royal tombs, Egypt, *Proc. Tenth Intern. Conf. Soils Mech. and Found.Engin.*, Stockholm, 10, 3, **1981**, pp. 71-74.
- ÉVRARD H., GUILLAUME A., Analyse structurale et géotechnique de la tombe de Ramsès II. Vallée des Rois, Louqsor, Égypte, *Memnonia*, VIII, **1997**, pp. 129-149.
- GOLVIN J.-C., Le dessin architectural des anciens égyptiens, *Dossiers d'Archéologie*, 265, **2001**, pp. 16-23.
- GUILLAUME A., Prospection microgravimétrique dans la tombe de Ramsès II [KV.7], Vallée des Rois, Louqsor, Égypte, *Memnonia*, XI, **2000**, pp. 71-90.
- GUILLAUME A., Paramètres mécaniques des géomatériaux et modélisation numérique des hypogées de la Vallée des Rois (Louqsor, Égypte) : essais géotechniques et réalité, *Ibidem*, XII-XII, **2001-2002**, pp. 143-190.
- GUILLAUME A., Sur quelques problèmes géotechniques et architecturaux concernant la tombe de Ramsès II [KV.7] (Vallée des Rois, Louqsor, Égypte), *Revue d'Archéométrie*, 26, **2002**, pp. 33-45.
- GUILLAUME A., La conception architecturale de l'hypogée de Ramsès II ([KV.7], Vallée des Rois, Louqsor, Égypte) : « effet de sol » et « effet de voûte » dans la chambre sépulcrale, *Memnonia*, XIII, **2003**, sous presse.
- GUILLAUME A., HUMBERT P., SABLON J.-Y., Analyse architectonique par modélisation numérique de la tombe de Ramsès II (Vallée des Rois, Louqsor, Égypte), *Revue d'Archéométrie*, 21, **1997**, pp. 67-80.
- GUILLAUME A., JEANNETTE D., PAQUET H., SERRATRICE J.F., Géotechnique de la Formation d'Esna et conservation de la tombe de Ramsès II (Vallée des Rois, Louqsor, Égypte), *Revue d'Archéométrie*, 25, **2001**, pp. 113-123.
- GUILLAUME A., JEHENNE F., LEBLANC Ch., MARTINET G., Roches, mortiers et enduits de la tombe de Ramsès II, Vallée des Rois, Louqsor, Égypte, *Actes Congr. LCP, Conservation et restauration des biens culturels*, Lausanne, **1995**, pp. 77-82.
- HUMBERT P., CESAR-LCPC. Un code général de calcul par éléments finis, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 160, **1989**, pp. 112-115. Voir aussi le site internet : [www.lcpc.fr](http://www.lcpc.fr).
- LEBLANC Ch., Trois campagnes de fouilles dans la tombe de Ramsès II. [KV.7] – Vallée des Rois – 1993/1994/1995, *Memnonia*, VII, **1996**, pp. 185-211. Quatrième campagne de fouille dans la tombe de Ramsès II [KV.7], *Ibidem*, VIII, **1997**, pp. 151-172. Cinquième campagne de fouille dans la tombe de Ramsès II [KV.7], 1997-1998, *Ibidem*, IX, **1998**, pp. 73-91. Sixième et septième campagnes de fouille dans la tombe de Ramsès II [KV.7], 1999-2000, *Ibidem*, XI, **2000**, pp. 91-116.
- LEITZ Ch., Altägyptische Sternuhren, *Orient. Lovan. Anal.*, Peeters, Éditeur, 1 vol., **1995**, 317 pages ; commenté par J.-L. FISSOLO : Les astronomes égyptiens, *Égypte, Afrique et Orient*, 21, **2001**, pp. 15-24.
- MAURY V., PIAU J.-M., HALLE G., Subsidence induced by water injection in water sensitive reservoir rocks : the exemple of Ekofisk, *Actes European Petroleum Conf.*, Milan, SPE 36890, **1996**, 17 pages.



- MAYSTRE Ch., Le tombeau de Ramsès II, *Bull. IFAO*, XXXVIII, **1938-1939**, pp. 183-190.
- RUTHERFORD J.B., Geotechnical causes of ancient tomb damage, Valley of Kings, Egypt, *Proc. Symp. on geotechn. Aspects of Restoration and Maintenance of infrastructures and historical Monuments*, Bangkok, Balkema, Éditeur, **1988-1990**, pp. 3-15.
- RUTHERFORD J. & CHENEK, ROMER J., Damage in the royal tombs in the Valley of Kings at Thebes , *Prelim. Report to the President of the Egyptian Organization of Antiquities*, 1 brochure, **1977**, 40 pages et appendices (inédit).
- SABLON J.-Y., Étude structurale du tombeau de Ramsès II, *Mémoire de DEA*, ENTPE/LCPC, **1994**, 2 vol., 62 pages, 203 figures (inédit).
- SALENÇON J., Calcul à la rupture et analyse limite. Cours de calcul de structures anélastiques, *Presses de l'E.N.P.C.*, Éditeur, **1983**, 1 vol., 366 pages.
- SERRATRICE J.F., Essais de laboratoire sur des sols gonflants, *Rapport LRPC d'Aix-en-Provence*, jfs i98-098, 1 brochure, **1998**, 136 pages, 37 figures, 13 photographies (inédit).
- TIRADRITTI F., Cinque anni di scavi nella tomba di Harwa (Assassif), *Cento Anni in Egitto*, sous la direction de M. Casini, *Eclecta*, Éditeur, **2001**, pp. 67-82.
- WÜST R.A.J., Mc LANE J., Rock deterioration in the Royal Tomb of Seti I, Valley of the Kings, Luxor, Egypt, *Engineering Geology*, 58, **2000**, pp.163-190.