

ORIENTALIA LOVANIENSIA  
ANALECTA  
————— 150 —————

PROCEEDINGS OF THE  
NINTH INTERNATIONAL  
CONGRESS OF EGYPTOLOGISTS

ACTES DU NEUVIÈME CONGRÈS  
INTERNATIONAL DES ÉGYPTOLOGUES

Grenoble, 6-12 septembre 2004

Volume I & II

EDITED BY / ÉDITÉS PAR

Jean-Claude GOYON et Christine CARDIN



UITGEVERIJ PEETERS en DEPARTEMENT OOSTERSE STUDIES  
LEUVEN – PARIS – DUDLEY, MA  
2007

## LA CONSTRUCTION DE LA GRANDE PYRAMIDE

JEAN-PIERRE HOUDIN

### INTRODUCTION

La pyramide de Kheops, la plus élaborée du plateau de Gizeh en Égypte a été étudiée par d'innombrables savants. On connaît pratiquement tout d'elle, sauf le point le plus important: le mode de construction. Trois hypothèses sérieuses sont avancées pour la mise en place de 2.600.000 m<sup>3</sup> de maçonnerie:

1. l'utilisation de machines de bois rudimentaires, évoquée par Hérodote, permettant d'élever les blocs de gradin en gradin (*crossai* et *bômides*), ce qui impliquerait l'emploi de milliers d'engins dans un site dépourvu de forêts; cette technique semble, de plus, mal adaptée à la structure hétérogène de la pyramide, telle qu'on la connaît aujourd'hui, et au déplacement des monolithes;
2. la rampe droite frontale, levée de terre évoquée par Diodore de Sicile dont le volume, à apporter puis à évacuer atteindrait, selon certains auteurs, jusqu'à 3 fois celui de l'édifice. Or, aucun dépôt d'une telle importance n'a été retrouvé dans les parages et, par contre, le volume de matériaux extraits de la carrière voisine n'en représente que les 5/6<sup>e</sup>;
3. la rampe hélicoïdale enveloppant la pyramide et constituée en briques de terre séchée. Elle recèle des défauts majeurs: le risque de glissement de sections entières de rampe et la difficulté de tourner le convoi à chaque arête. Elle implique surtout que des gradins restent apparents jusqu'à l'achèvement et que le revêtement en pierre de Tourah soit ravalé à la fin ou qu'il soit posé en partant du haut, ce qui est une aberration en maçonnerie. Elle ne permet pas un contrôle des dimensions pendant toute la durée des travaux et, enfin, pour être efficace son volume doit être d'environ 400.000 m<sup>3</sup>, ce qui est énorme.

Après avoir mis en évidence les faiblesses de chacune, ainsi que des nombreuses extrapolations qui en ont été imaginées, et étudié minutieusement tous les composants de la pyramide, les auteurs ont répertorié tous les paramètres qui ont conditionné l'organisation du chantier, que tous les égyptologues imaginent de très haute qualité; à partir de ceux-ci, ils ont élaboré un système logique et cohérent basé sur deux concepts novateurs qui permettent de résoudre tous les problèmes de construction:

Le premier, la rampe intérieure droite à quart tournant, chaînon manquant entre une rampe extérieure limitée à moins du tiers de la hauteur et l'emploi d'une tour de levage pour les dernières assises, permet, grâce à sa faible pente, d'assurer en toute

sécurité, et dans des conditions optimales, la continuité de l'approvisionnement du chantier en matériaux pendant toute la durée des travaux.

Le second, le système à contrepoids, dont la Grande Galerie est un des éléments clé, permet l'élévation et la mise en place avec précision de tous les énormes monolithes que l'on trouve dans les différents ouvrages intérieurs, permettant une réduction importante du nombre d'hommes dans les équipes de traction des traîneaux.

#### LES RAMPES ET LES MACHINES

La construction de la pyramide elle-même est assurée par une synthèse de trois techniques mises en œuvre successivement :

- une rampe extérieure, jusqu'au niveau de la 50<sup>e</sup> assise (+43,11 m), construite pour l'essentiel avec les matériaux de la carrière voisine, les mêmes que ceux du corps de la pyramide; en appui sur la face sud suivant un angle de 20°, celle-ci, d'une longueur d'environ 500 m pour une pente de 7,5%, ne dépasse pas 750.000 m<sup>3</sup>. Elle est réalisée dès le départ à sa longueur maximum et élevée par couches horizontales successives. Elle est divisée en deux voies égales, décalées d'une hauteur d'assise et séparées par un socle central maçonné, aménagé en rail ou chaussée monumentale. L'utilisation est alternée: pendant que l'une sert au transport des matériaux, l'autre est en cours d'exhaussement de deux niveaux d'assises à la fois, de même que le socle central. Elle permet de réaliser 73% du volume de la pyramide et de transporter aisément, grâce au rail central, les monolithes les plus lourds, en particulier ceux de la Chambre du Roi;
- une rampe intérieure droite à quart tournant, partant de l'angle sud-est au niveau de la 6<sup>e</sup> assise (+7,06 m), première plate-forme réellement horizontale, et constituée d'une succession de vingt et une galeries droites de faible largeur (cinq coudées environ), qualifiées d'épidermiques, situées dans la maçonnerie de soutien parallèlement aux faces, à une distance comprise entre trois et quatre mètres de la paroi d'origine. Cette position comporte deux avantages: d'une part, cela permet de réaliser des galeries parfaitement maçonnées, avec un sol très résistant et une voûte en tas de charge construite au fur et à mesure de l'avancement; d'autre part, étant près de la face, la charge qui la surplombe est réduite au minimum. Cette rampe, d'une pente moyenne de 7,13% (une paume pour deux coudées), est utilisable en permanence. Elle part à chaque volée d'un palier en encoche ouvert sur l'extérieur au droit d'une arête et débouche dans la paroi perpendiculaire, sur le palier d'une nouvelle encoche. De là elle repart à angle droit, parallèlement à la nouvelle face jusqu'à la face perpendiculaire suivante.

Avec un lit de pose des pierres suivant la pente, les parois latérales sont verticales sur une hauteur d'environ deux mètres (quatre coudées), puis les blocs sont disposés en

encorbellement sur cinq rangs de part et d'autre pour se rejoindre au sommet et former une voûte en tas de charge. Le sol des galeries comporte une réservation dans laquelle glissent les patins des convois de traîneaux supportant les charges; un léger crantage des lignes de foulées permet aux tireurs d'avoir une bonne adhérence. Ceux-ci travaillent en toute sécurité dans de bonnes conditions de température, la ventilation étant naturelle par effet de cheminée; l'éclairage est assuré par un réseau de lampes à huile intégré dans les parois latérales.

Chaque équipe de traction est affectée à une volée et ne tire un traîneau que sur cette portion de trajet; les équipes se relayant, cela permet aux hommes de souffler pendant le trajet de retour. Sur chaque palier, la rotation des traîneaux est assurée au moyen d'une chèvre manœuvrée par des équipes de grutiers. Une coursière extérieure en bois courant parallèlement à la rampe intérieure assure une liaison complémentaire entre les paliers, permettant aux attelages de revenir au palier. A la fin de leur utilisation, les encoches, réservées dans les arêtes, sont soigneusement rebouchées avec des blocs de même provenance de telle sorte qu'aucune différence ne soit visible.

Après l'achèvement de la Chambre du Roi, la rampe intérieure est la seule utilisée et les matériaux ayant constitué la rampe extérieure sont réutilisés dans le corps de la partie supérieure, d'où une récupération maximale; aucun dépôt de résidus de grande ampleur n'a jamais été retrouvé;

– à partir de la 188<sup>e</sup> assise (+130,26 m) et jusqu'au sommet de l'ouvrage, il ne reste plus que 8.000 m<sup>3</sup> environ à mettre en place. Pour cela, les matériaux livrés par la rampe intérieure, sur un dernier palier en encoche, sont élevés à l'aide d'une tour de levage. Cette méthode est parfaitement adaptée puisque, à ce niveau les blocs, plus petits, sont bien calibrés.

Quant au pyramidion, d'une quinzaine de tonnes, il est introduit à l'intérieur de la pyramide au même moment que les monolithes; il est ensuite élevé sur lui-même grâce à une chèvre spéciale quadripode. Celle-ci est surélevée au niveau de la nouvelle assise construite sous le pyramidion après chaque élévation du pyramidion.

#### LE SYSTÈME À CONTREPOIDS

Le déplacement des énormes monolithes des ouvrages intérieurs est assuré par un ingénieux système à contrepoids qui est utilisé pendant deux phases: la première pour amener les blocs sur une aire de stockage provisoire aménagée sur l'assise au niveau de la base de l'ouvrage à construire, la seconde pour leur mise en place définitive à la hauteur requise.

Le principe est de diminuer substantiellement l'effort pour monter une charge grâce au contrepoids, de remplacer un halage continu par des tractions en force brèves et fractionnées et de faire manœuvrer les attelages à l'horizontale.

Pour la montée des monolithes vers l'aire de stockage, le contrepoids est réarmé avant chaque traction puis relié à la charge à monter par l'intermédiaire d'un ensemble de cordes segmentées, tel une chaîne d'arpenteur. Un cycle réarmement/traction est ainsi répété autant de fois qu'il est nécessaire, la longueur de course du contrepoids déterminant la longueur des segments et donc d'une traction. Après chaque traction, un segment de la chaîne est supprimé, l'ensemble raccourcissant d'autant.

Ce système est basé à partir des composants suivants :

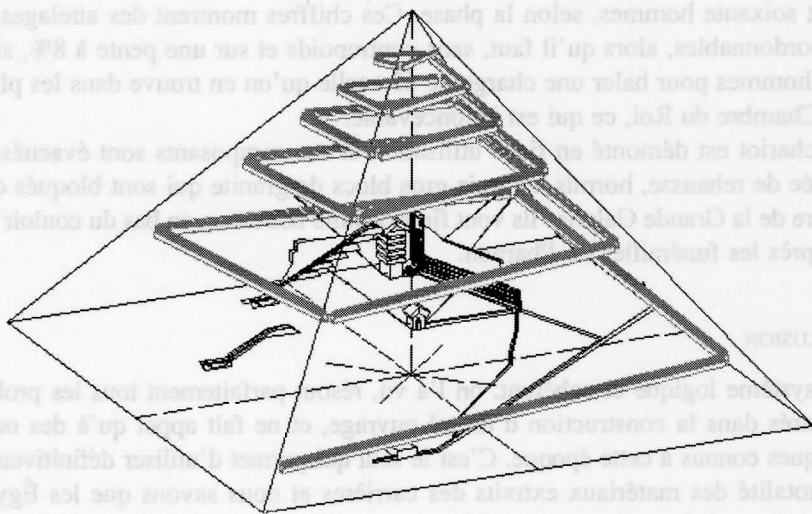
- un contrepoids glissant dans une gaine située dans la partie nord de la pyramide, au-delà de l'ouvrage à construire,
- la rampe extérieure sur la face sud équipée de son socle central formant rail et d'un espace de traction sur l'assise elle-même (pour la première phase)
- une rampe spéciale, d'une pente de  $26,2^\circ$ , élevée dans la face sud d'une pyramide intérieure érigée au fur et à mesure des besoins autour de cet ouvrage pour la mise en place définitive des monolithes et d'un espace de traction au niveau de l'assise atteinte de la pyramide intérieure (pour la deuxième phase)

L'alignement des murs *est* de tous les ouvrages à l'intérieur de la pyramide et le décalage de 7,20 m des axes des couloirs vers l'Est s'explique ainsi : les monolithes arrivent tous sur le même côté des Chambres et sont ensuite ripés latéralement et de façon dégressive vers l'Ouest jusqu'à couvrir la totalité de celles-ci.

Le système est d'abord expérimenté pour la construction du toit de la Chambre de la Reine (celle-ci étant, en plus d'une chambre funéraire de secours, une maquette grandeur nature *in situ*), et ses composants sont constitués du couloir ascendant ( $26,2^\circ$ ) pour le contrepoids, de la rampe extérieure parvenue au niveau +20,83 m pour la première phase et d'une première rampe spéciale dans la face sud de la pyramide intérieure érigée autour de la Chambre pour la deuxième phase.

L'expérimentation étant probante, le système est mis en oeuvre pour la construction de la Chambre du Roi, objectif principal du chantier de la pyramide. Les éléments constitutifs du système sont alors les suivants :

- la Grande Galerie, d'une pente de  $26,2^\circ$ , est la glissière dans laquelle coulissera le contrepoids,
- la rampe extérieure parvenue au niveau +43,11 m, permet, grâce à son rail central, la montée des monolithes jusqu'à l'aire de stockage implantée à ce niveau (pour la première phase). L'arrivée de la rampe intérieure à son troisième palier au même niveau permet d'avoir un accès complémentaire dans la partie sud de la pyramide,
- la deuxième rampe spéciale dans la face sud de la pyramide intérieure érigée autour de la Chambre au fur et à mesure de la construction des plafonds, cette rampe étant prolongée à chaque fois en conséquence (pour la deuxième phase).



Le contre poids est à poids variable. Il est composé de trois gros blocs de granite sertis dans un chariot à patins glissant sur les banquettes latérales de la Grande Galerie, les blocs étant suspendus dans la tranchée créée entre les deux banquettes. L'ensemble pèse 17 t mais son poids peut être augmenté en fonction des besoins par l'apport de un à trois blocs complémentaires de 2,5 t chacun; le maximum opérationnel est de 24,5 t.

Le chariot est équipé d'un dispositif de sécurité permettant le blocage du chariot en cas de rupture des cordes de traction ou de réarmement. Des rochets taillés à distance régulière (deux coudées) dans les banquettes servent à recevoir les cliquets de blocage montés sur le chariot. Deux rails de guidage, au niveau du troisième encorbellement, assurent le maintien en ligne du chariot. La Chambre des Herses sert dans un premier temps de local technique dans lequel sont ancrées les cordes de réarmement du contre poids. Ces cordes et celles de restitution de force passent, pour la première phase, par la Chambre des Herses, puis, pour la deuxième phase, par des dispositifs construits les uns au-dessus des autres au fur et à mesure de la construction des plafonds.

Pour éviter un conflit avec le plafond de la Grande Galerie à partir d'un certain angle de débattement des cordes, celle-ci reste à ciel ouvert pendant tout ces travaux, étant prolongée par une tranchée de rehausse; ainsi se trouve justifiée la grande largeur des dalles en partie haute, celle-ci étant inhabituelle pour une voûte en tas de charge. En fin d'utilisation, la Galerie est recouverte par ces dalles descendues verticalement depuis le bord supérieur de la tranchée de rehausse et posées suivant une technique particulière (cliquets et rochets); la tranchée est ensuite comblée.

Pour le réarmement du contre poids, il faut au maximum une centaine d'hommes. Quant à la montée des charges et en fonction du poids de celles-ci, il faut entre cent

et cent soixante hommes, selon la phase. Ces chiffres montrent des attelages tout à fait coordonnables, alors qu'il faut, sans contrepoids et sur une pente à 8%, six cent trente hommes pour haler une charge de 63 t telle qu'on en trouve dans les plafonds de la Chambre du Roi, ce qui est inconcevable.

Le chariot est démonté en fin d'utilisation et ses composants sont évacués par la tranchée de rehausse, hormis les trois gros blocs de granite qui sont bloqués dans la glissière de la Grande Galerie: ils vont finir comme bouchons en bas du couloir ascendant après les funérailles du Pharaon.

## CONCLUSION

Ce système logique et cohérent, on l'a vu, résout parfaitement tous les problèmes rencontrés dans la construction d'un tel ouvrage, et ne fait appel qu'à des outils et techniques connus à cette époque. C'est le seul qui permet d'utiliser définitivement la quasi-totalité des matériaux extraits des carrières et nous savons que les Égyptiens étaient très soucieux de ne pas gâcher ceux-ci, les outils à leur disposition étant consommés très rapidement. La rampe extérieure permet, même en s'arrêtant au niveau +43,11 m, d'approvisionner tous les monolithes et de réaliser 73% de la pyramide, grâce à la construction de la pyramide intérieure autour et au-dessus de la Chambre du Roi jusqu'au niveau +68,27 m. La rampe intérieure permet, en réutilisant les matériaux provenant du démontage de la rampe extérieure, la réalisation de la partie manquante entre le niveau +43,11 m et le niveau +68,27m, puis de continuer l'élévation de la pyramide; au niveau +130,26 m, la tour de levage prend alors le relais pour les dernières assises, la rampe intérieure continuant à alimenter le chantier.

Le chantier est exécuté en continu, en flux tendu, puisque les rampes, suivant cette conception, sont en permanence utilisables. La pyramide est autonome du début à la fin, s'auto-alimentant dans sa dernière partie. Les conditions de contrôle de l'élévation sont optimales car aucune structure ne masque les arêtes, les diagonales et les bords de la pyramide, et les assises sont réalisées horizontalement couche par couche; un nivellement général n'intervient seulement qu'au niveau de chaque nouveau palier, permettant le traçage de la volée suivante de la rampe. La majeure partie du ravalement est effectuée au cours des travaux, seuls quelques blocs du sommet, de l'entrée, des encoches et des appuis de la coursière extérieure sont ravalés en fin de chantier.

## PRÉSENTATION DES DISCIPLINES DE RECHERCHE DES GALERIES DE CONSTRUCTION

### 1. *Microgravimétrie*

La gravimétrie est l'étude des variations du champ de pesanteur  $g$  à la surface de la terre, provoquée par la variation de la masse du site ausculté. La valeur du champ de pesanteur en un point de la surface terrestre est définie par rapport à un ellipsoïde

de référence en fonction de la latitude du point de mesure. Elle est donnée par la formule adoptée en 1980 par le Geodetic Reference System. L'unité CGS de mesure en gravimétrie est le gal, en référence à Galilée. Il est défini par:  $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm} / \text{s}^2$ .

Dans les années 70, l'amélioration des appareils a permis l'étude de structures dont le défaut de masse engendre des anomalies de l'ordre du microgal (soit le milliardième de la gravité terrestre de 981 gal): c'est la microgravimétrie

### 2. Détection photothermique

En prenant l'exemple de la face sud, il y a forcément une différence de température de surface entre la fin de la nuit et le moment, vers le soir, où l'exposition au soleil a eu son plein effet, cette différence étant liée à l'inertie thermique de la maçonnerie. Peut-on imaginer que la présence d'une galerie, remplie d'air, à faible distance de la paroi, en modifiant la masse dans ce secteur, puisse avoir une influence sur cette différence de température?

S'il en est bien ainsi, la comparaison entre les résultats obtenus à l'aide de caméras infrarouge, à diverses heures de la journée, devrait faire apparaître les galeries par des différences de teintes barrant la surface de la paroi.

Un autre indice pourrait être exploité. Les blocs n'étant pas jointifs, une circulation d'air, due aux différences de température entre les cavités internes et l'extérieur, serait matérialisée sur des photos prises en infrarouge telles des fumerolles. Il existe des appareils suffisamment sensibles pour détecter de très faibles différences de température inférieures à  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3. Réflectométrie radar

La méthode radar est électromagnétique haute fréquence en champ lointain dont les mesures sont conduites dans le domaine temporel. La source est un générateur d'impulsions (de l'ordre de la nanoseconde) émise à travers une antenne. La réception se fait par cette même antenne (cas monostatique) ou par une autre antenne (cas bistatique) ou plusieurs autres antennes (cas multistatique). Les mesures sont conduites par des matériels analyseurs vectoriels de spectre et antennes.

### 4. Échographie ultrasonore et tomographie sismique

Ces méthodes sont basées sur l'étude de la propagation des ondes mécaniques. Ces ondes sont provoquées en un point-source par un choc. Lorsqu'elles rencontrent un contraste d'impédance, elles se réfléchissent partiellement vers un point de réception où leurs caractéristiques sont mesurées et analysées pour étudier les propriétés du trajet parcouru.

On distingue des ondes de volume et des ondes de surface.



### 5. Dispositif multi-électrodes

La technique, dite des «dispositifs multi-électrodes en courant continu» ou du «panneau électrique» est fondée sur le même phénomène physique que le sondage électrique. Elle permet d'étudier la distribution des résistivités «vraies» dans un proche rayon d'action, quelle qu'en soit la complexité. En particulier de détecter des galeries vides dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de la profondeur de leur toit. Le dispositif théorique est constitué de 20 à 30 électrodes équidistantes situées à 50 cm l'une de l'autre, disposées le long d'un profil perpendiculaire à la galerie recherchée. Les résultats bruts sont représentés sous la forme d'une «pseudo-coupe». La galerie vide doit générer une anomalie très résistante au sein d'un milieu résistant, le calcaire.

### 6. Technique électromagnétique type Slingram

La technique électromagnétique de type Slingram à faible nombre d'induction, mise en œuvre grâce à l'EM 31 de GEONICS peut être tentée simultanément à la méthode à courant continu précédente. Elle est destinée à détecter des anomalies de conductivité électrique dans un environnement conducteur. L'émetteur et le récepteur sont de type «dipôle magnétique». La réalisation d'un profil de l'ordre de 15 à 20 m perpendiculairement à la galerie présumée et centré sur cette dernière prendra environ 15 à 20 minutes, avec tout le soin nécessaire pour pousser cette technique à l'extrême limite de ses possibilités

### 7. Radiomagnétotellurique RMT

Cette méthode en champ lointain est née avec les télécommunications par l'utilisation opportune et astucieuse des ondes radio dédiées initialement à des applications militaires et civiles, la bande de fonctionnement de ces émetteurs étant considérée ici comme ponctuelle

### 8. Photogrammétrie architecturale

La stéréophotogrammétrie est importante pour l'interprétation du détail des images et pour l'obtention de mesures et dessins en 3 D. Pour avoir un relevé précis, il faut associer aux prises de vues terrestres des vues complémentaires prises par-dessus, par un moyen aérien, ainsi qu'éventuellement des vues obliques. La restitution en mode stéréoscopique est indispensable à l'observation des détails visibles. Le traitement en bloc de l'ensemble des photos avec des logiciels spécifiques permet de garantir l'homogénéité de la restitution et, localement, celle des moindres détails visibles (fissures, arêtes etc....) à la surface de l'objet avec une précision de l'ordre du centimètre.

2.1	GRAFF, Gwenola, <i>Les représentations prédynastiques d'oryctéropes ...</i>	829
10	GREGERSEN, Mette, <i>Butler, Cupbearer, L'échanson or Truchsess .....</i>	839
14	GUASCH, Maria Rosa, IBERN, Maïte, ANDRÉS, Cristina, LAMUELA, Rosa M., <i>Scientific Research on Archaeological Residues from Ancient Egyptian Wines .....</i>	851
14	GUICHARD, Hélène, NOTIN, Véronique, COIGNARD, Benoît, FABRE, Made- leine, BONCŒUR, Marie-Paule, <i>La tomographie à rayons X au service de l'étude et de la restauration d'un sarcophage du Musée Municipal de l'Évêché à Limoges .....</i>	857
13	GUICHARD, Sylvie, <i>Nouvelle approche de Bernardino Drovetti, consul de France en Égypte de 1803 à 1829, à partir d'une correspondance inédite récemment acquise par le Musée du Louvre .....</i>	871
12.2	GUIDOTTI, Maria Cristina, <i>La céramique d'Antinoopolis. Fouilles 2003 et 2004 .....</i>	877
8.3	GUILHOU, Nadine, ARQUIER, Bernard, <i>Ciels diurnes et ciels nocturnes ...</i>	883
4.5	GULYÁS, Andras, <i>A Cosmic Libation. Researches on the Theology of Luxor Temple .....</i>	895
6.1	GYÖRY, Hedvig, <i>The Story of the Gamhud Excavations .....</i>	907
12.1	HOUDIN, Jean-Pierre, <i>La construction de la grande pyramide .....</i>	919
8.3	IBRAHIM ZAKI, Mey, <i>Les déesses dans les tombes de Deir el-Médineh ..</i>	927
7.1	IKRAM, Salima, <i>The North Kharga Oasis Survey: A Brief Overview ....</i>	953
2.1	INCORDINO, Iliaria, <i>The Third Dynasty: A Chronological Hypothesis ....</i>	961
14	JIMÉNEZ SERRANO, Alejandro, ORDÓÑEZ GARCÍA, Javier, <i>The Temple of Horus at Edfu: Future Strategies of Conservation .....</i>	969
2.1	JONES, Jana, <i>New Perspectives on the Development of Mummification and Funerary Practices during the Pre- and Early Dynastic Periods ..</i>	979
4.5	KJØLBY, Annette, <i>Decision-making Processes: A Cognitive Study of Pri- vate Statues in New Kingdom Temples .....</i>	991
11	KOLEVA-IVANOV, Elka, «Être sous l'emprise de la mort ( <i>hry mt</i> )» dans <i>les textes magiques et littéraires égyptiens .....</i>	1001
4.1	KOLTSIDA, Aikaterini, <i>Malkata Revisited: Defining Domestic Space at the Palace City of Amenhotep III .....</i>	1011
2.4	KORMYSHEVA, Eleonora, <i>Minor Cemetery on the Eastern Edge of the Eastern Necropolis in Giza .....</i>	1023
13	KOROLEVA, Natalia E., <i>Egyptology and Egyptomania in Russia in the XIX<sup>th</sup> and the Beginning of the XX<sup>th</sup> Century .....</i>	1037
11	KOUSOULIS, Panagiotis I.M., <i>Dead Entities in Living Bodies: the Demo- nic Influence of the Dead in the Medical Texts .....</i>	1043
7.1	KRAEMER, Bryan, <i>A Ptolemaic Canal in the Northeast Fayyum: The His- tory of the Bahr Wardan .....</i>	1051



PEETERS

PEETERS - BONDGENOTENLAAN 153 - B-3000 LEUVEN