

This article was downloaded by: [Universite de Lorraine]

On: 14 January 2015, At: 00:54

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK

Revue Européenne de Génie Civil

Publication details, including instructions for authors and subscription information:
<http://www.tandfonline.com/loi/tece19>

Le génie des pyramides

Pierre Crozat ^a & Thierry Verdel ^a

^a Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages , Ecole des Mines de Nancy ,
Parc Saurupt, F-54042, Nancy cedex E-mail:

Published online: 05 Oct 2011.

To cite this article: Pierre Crozat & Thierry Verdel (2007) Le génie des pyramides, Revue Européenne de Génie Civil, 11:9-10, 1135-1154

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/17747120.2007.9692980>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

Le génie des pyramides

Pierre Crozat — Thierry Verdel

*Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages
Ecole des Mines de Nancy, Parc Saurupt F-54042 Nancy cedex
Pierre.Crozat@free.fr - Thierry.Verdel@mines.inpl-nancy.fr*

RÉSUMÉ. Le mode de construction des pyramides d’Égypte demeure, aujourd’hui encore, une véritable énigme. Les théories avancées jusqu’à ce jour n’offrent pas une approche satisfaisante pour l’esprit scientifique pas plus que d’éléments de preuves tangibles. Un faisceau d’indices relevés sur le terrain et une relecture des écrits d’Hérodote permettent par contre de proposer un système constructif cohérent, compatible avec les principes de la construction ainsi qu’avec le niveau technologique et le mode de pensée de l’époque. Ce système tient compte de l’environnement géologique des pyramides et s’inscrit dans un continuum technique que nous mettons en évidence reprenant et renouvelant ainsi les intuitions d’A. Choisy. La pyramide de Khéops, la plus énigmatique par ses dispositifs intérieurs, se trouve alors paradoxalement être la plus révélatrice de ce « système constructif ».

ABSTRACT. The building of egyptian pyramids still remains today an enigma. None of the present theories can satisfy scientists or practitioners of the art of building and offer any convincing evidence. Based on in situ observations, geological constrains and basics of the art of buildings, we suggest a global building system called “pyramidal growth” which confirms the writings of Herodotus and can be placed in a “technical continuum”. We focus in particular on the Kheops’ pyramid, the most enigmatic one because of its internal design, but actually and paradoxically the most revealing of the pyramids’ constructive system.

MOTS-CLÉS : construction des pyramides, accrétion-exhaussement, système constructif, grande galerie, Hérodote, fracturation naturelle, continuum technique, Égypte, accroissement pyramidal, accrétion-exhaussement.

KEYWORDS : building of pyramids, building system, technical continuum, Egypt, pyramidal growth, Herodotus, natural fracturation, great gallery.

DOI:10.3166/REGC.11.1135-1154 © 2007 Lavoisier, Paris

1. Introduction

Depuis bientôt 5 000 ans qu'elles furent édifiées, le mode de construction des pyramides d'Égypte demeure, aujourd'hui encore, une véritable énigme.

Les trois plus grandes se situent sur le plateau de Gizeh, proche du Caire et sont datées de la IV^e dynastie, sous l'Ancien Empire. La plus grande, celle du pharaon Khéops, s'élève à 147 m.

Les théories avancées jusqu'à ce jour s'opposent et ne sauraient satisfaire pleinement le praticien de l'art de bâtir. Aucune d'elles n'offre une approche véritablement scientifique, technique et opératoire, pas plus que d'éléments de preuves tangibles.

La plupart des approches relativement sérieuses (car il y en a qui le sont beaucoup moins) ont été émises par des architectes ou des égyptologues, plus ou moins réputés, mais la question n'a jamais véritablement fait débat dans le monde de l'égyptologie. Encore très récemment, Jean-Pierre Houdin, architecte, sur une idée de son père ingénieur, faisait l'actualité médiatique à ce sujet. C'est dire que la question de la construction des pyramides n'a pas trouvé sa place dans l'égyptologie officielle renforcée en cela par l'absence d'écrits contemporains de la construction qui puissent apporter des preuves littéraires. Et c'est aussi pourquoi nous nous tournons aujourd'hui vers la communauté du génie civil, finalement la plus qualifiée, en l'absence de preuves formelles, à traiter de cette question et à porter un jugement sur les différentes propositions qui peuvent être faites.

Dès l'Antiquité, deux modèles interprétatifs s'opposent : théories « machinistes » à l'instar d'Hérodote (Barquet, 1964) contre théories « rampistes » à la suite de Diodore de Sicile (Casevitz, 1991).

Les « machinistes » se sont bornés à rechercher la « machine » capable d'élever un bloc de la hauteur d'une assise, sans envisager le système constructif dans son ensemble (figures 1 et 2). Il s'agit notamment de la chèvre de Strub-Roessler (1952), de l'élévateur de Croon (1925) ou de l'ascenseur oscillant proposé par G. Legrain (cité par Adam, 1975). Mais ces machines se révèlent incapables de mettre en place les monolithes de granite – de 30 à 62 tonnes – qui couvrent la chambre du roi Khéops, situés entre 45 et 65 m de hauteur à l'intérieur de la pyramide.

Les « rampistes » proposent de hisser ces monolithes et l'ensemble des matériaux de la pyramide par glissement sur une rampe ou une levée de terre. C'est dans cette catégorie que l'on trouve la rampe frontale de Lauer (1988), la rampe hélicoïdale de Goyon (1977), la rampe latérale de Stadelmann (1990), ou encore la rampe engagée d'Arnold (1981, 1996). Mais la destruction (ou suppression) de cet ouvrage annexe, qu'il faudra bien faire disparaître, nécessitera plus de travail encore que la construction de la pyramide elle-même (figures 3 et 4).

Une troisième famille de théories dites « mixtes », notamment représentée par Kérisel (1991) et Adam (1975), propose de réaliser une rampe jusqu'au niveau de la

chambre du roi (pour permettre l'installation des monolithes) puis d'utiliser une machine.

D'autres auteurs proposent enfin des variations plus ou moins sophistiquées de ces approches. C'est le cas de Jean-Pierre Houdin (2002, 2006) dont la théorie a récemment fait l'actualité médiatique et qui combine une rampe externe jusqu'à la cinquantième assise (43 m) puis une rampe hélicoïdale interne pour les assises supérieures, tandis qu'il utilise la grande galerie pour l'installation des monolithes reprenant, de ce fait mais sans le citer, le modèle déjà proposé par Crozat en 1997.

Aucune de ces théories ne donne pleinement satisfaction à l'architecte, à l'ingénieur ou au constructeur, car avant d'être « objet » d'archéologie et d'égyptologie, le « sujet » des pyramides relève avant tout, par essence, du génie civil et de la construction dont les logiques demeurent immuables : économie d'effort et de moyens, approvisionnement en matériaux locaux, évolutivité technologique.

Aussi, il nous paraît difficile d'admettre les solutions « rampistes » ou « mixtes », trop contraires à l'art de bâtir. Si la rampe est frontale, compte tenu de la pente nécessairement faible pour pouvoir y haler les blocs (les auteurs s'accordent sur une pente maximale de 10 %), l'ouvrage sera gigantesque (figure 4) et le trafic limité (seule voie d'accès dans le cas d'une seule rampe) rendant difficile l'acheminement de près de 2,5 millions de blocs (soit environ 1 bloc toutes les deux minutes pour un chantier de 20 ans, fonctionnant 365 jours par an et 12 heures par jour). Si la rampe est hélicoïdale, externe (Goyon) ou interne (Houdin), elle est étroite ce qui limite d'autant le trafic ; la manœuvre dans les virages est délicate (par traction avec des cordes) ou lente (la machine de levage de Houdin). Par ailleurs, aucune trace de tels ouvrages annexes n'a été retrouvée à ce jour aux abords des pyramides.

Par contre, si chacun admet possible l'utilisation d'un levier, les théories « machinistes » sont demeurées trop embryonnaires jusqu'à aujourd'hui.

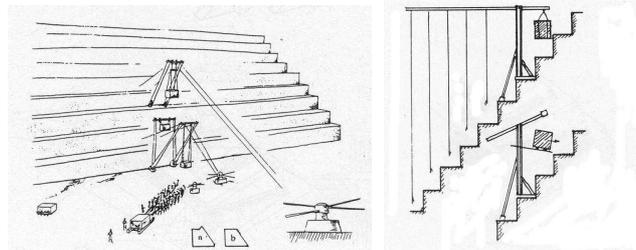


Figure 1. Chèvre de M. Strub-Roessler, élévateur de L. Croon (cités par Goyon, 1977)

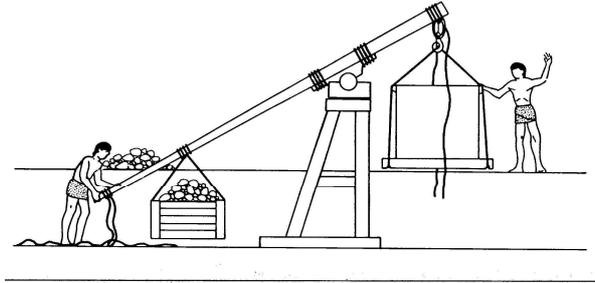


Figure 2. Bras de levier sur trépied proposé par J. P. Adam (1975). Si le principe et l'échelle semblent justes, le contrepoids pourrait être constitué d'ouvriers vivants servant de poids mort

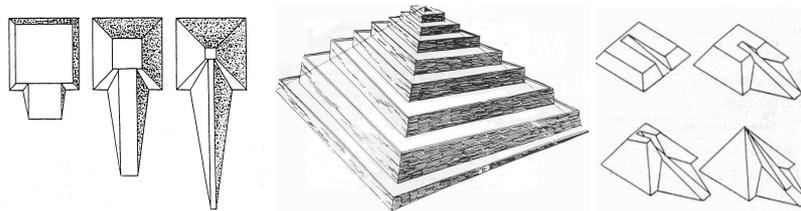


Figure 3. Rampe frontale (Lauer, 1988), rampe hélicoïdale (Goyon, 1977) et rampe engagée (Stadelmann, 1990, d'après Arnold)

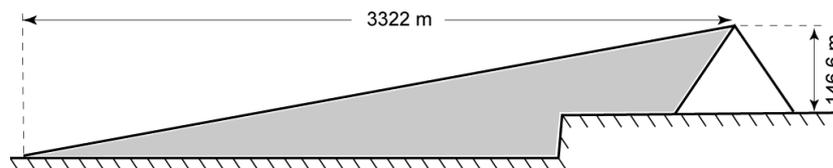


Figure 4. Simulation de la rampe frontale de la pyramide de Khéops (d'après Goyon, 1977)

2. Une approche scientifique, technique et opératoire

Tenant compte des intuitions et croquis d'Auguste Choisy (1904) pour qui « les pyramides sont exécutées par application successive de tranches de maçonnerie aux flancs d'un pyramidion central » (figure 5) et les observations de Karl Lepsius (1843) selon qui, « toutes les pyramides d'Egypte, y compris les grandes Gizeh, auraient été construites en gradins, avec additions successives de tranches de

maçonnerie appliquées aux faces parées de ces gradins et parallèlement à elle » (cité par Lauer, 1988, p. 68, comme illustré sur la figure 5b pour la pyramide de Djoser), notre approche s'inscrit dans la lignée des théories « machinistes », mais s'attache essentiellement à développer le « système constructif » dans son ensemble, plutôt que la machine elle-même qui reste à rechercher.

Elle repose sur les connaissances enseignées et les savoir-faire pratiques, sur la référence à un modèle original « interactif et prédictif » et sur la vérification par un ensemble d'observations archéologiques concernant les ouvrages et leur environnement, le tout assemblé en un raisonnement logique et cohérent.

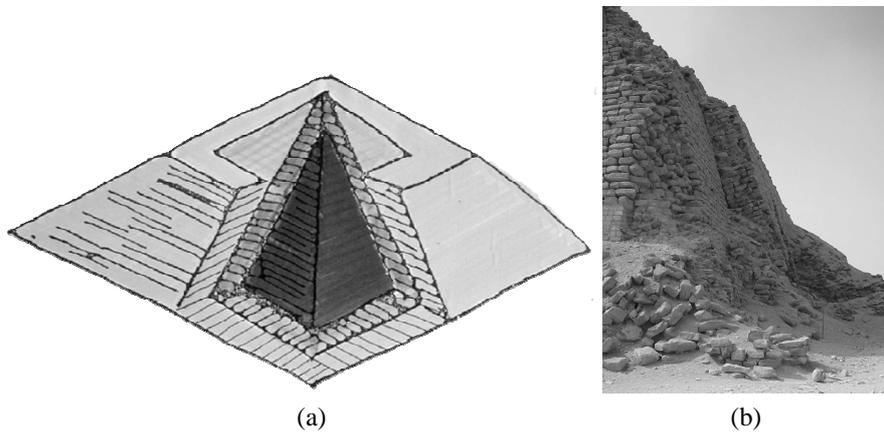


Figure 5. a) schéma « en pelures d'oignon » de A. Choisy (1904), b) photographie d'une parée de la pyramide à degrés de Djoser à Saqqarah (© T. Verdel)

C'est pourquoi, elle repose sur trois postulats fondamentaux :

- les matériaux de gros œuvre (blocs internes en calcaire local) sont empruntés sur place, au plateau de Gizeh en respect de l'économie d'effort (voir section 5). Les monolithes de granite de la chambre du Roi, quant à eux, proviennent d'Assouan (à 850 km au sud). De préférence, la pyramide est placée au centre de la carrière et l'on « exploite alentour pour foisonner au centre » ;
- la méthode de construction est simple, efficace, répétitive et économe en travail, basée sur le principe « toujours construire sur ce qu'on vient de construire », à partir d'un pyramidion central. En cela, elle se dispense d'un ouvrage annexe ;
- l'outillage ou « la machine » doit être facile à utiliser et à réaliser, il doit être re-situé dans le contexte technologique de l'époque, défini par les réalisations précédentes et contemporaines telles que la barque de Khéops.

3. Le procédé d'accroissement pyramidal

Il convient préalablement d'observer un « distinguo » entre les blocs de calcaire (de 2,5 tonnes en moyenne) qui constituent le massif de gros œuvre de la pyramide d'une part, et les 52 monolithes de granite (de 30 à 60 tonnes) qui couvrent la chambre du roi. En toute logique, ces deux types de blocs ne peuvent être mis en œuvre selon la même technique de transport-levage. Les premiers seront soulevés d'une assise sur l'autre à l'aide d'une simple « *machine faite de courtes pièces de bois* » *dixit* Hérodote : un trépied sur lequel appliquer un bras de levier par exemple, générant un système constructif en escalier. Les seconds devront être hissés par glissement sur un faisceau de plans inclinés qui seront réalisés, au moment opportun, par anticipation de la construction sur la face nord, en application du système. Enfin, une troisième sorte de pierre (calcaire ou granite selon la pyramide) constituant la dernière enveloppe, sera posée selon le système et ensuite ravalée.

La méthode de construction proposée est un véritable « système constructif » que nous proposons de dénommer « procédé d'accroissement pyramidal », basé sur :

- le mouvement élémentaire d'un bloc de calcaire de 2,5 tonnes consistant à l'élever de la hauteur d'une assise (0,7 m en moyenne) à l'aide d'une machine de bois telle qu'un levier sur un trépied (figure 6) ;
- la pose de ce bloc en recouvrement sur deux autres blocs préalablement posés, en « encorbellement » du côté interne laissant ainsi un « entablement » du côté externe à l'édifice (d'une longueur d'une coudée royale, soit environ 52 cm, sur lequel pourra reposer ultérieurement la machine (figures 6 et 7).



Figure 6. Modélisation du mouvement élémentaire au 1/10 (© P. Crozat) et simulation informatique, à droite, montrant une position possible pour les trépieds

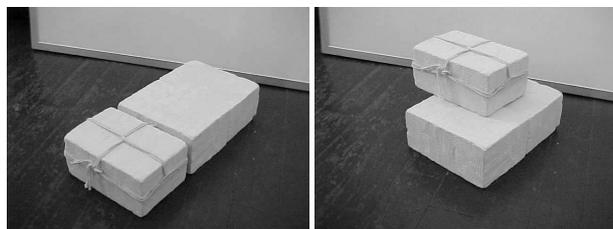


Figure 7. Pose en encorbellement-entablement. Ce mouvement constitue un algorithme (© P. Crozat)

Cette disposition est en fait classique de l'appareillage à joints croisés, dans les deux directions. Elle assure une meilleure cohérence à l'édifice. Elle nécessite néanmoins une suggestion d'assise horizontale pour chaque bloc qui, nous le verrons par la suite, ne sont pas réguliers.

La répétition de ce mouvement élémentaire, bloc après bloc, sur un « *créneau formant escalier* » (dixit Hérodote), face par face, génère des couches-enveloppes successives, emboîtées les unes dans les autres, à partir d'un pyramidion central au centre de la base (figure 8). Il permet d'accroître la pyramide par homothétie (centrale), par simple répétition additive. En cela, il perpétue le système d'accrétions successives bien visibles sur la pyramide à degrés de Djoser à Saqqarah tel que l'a décrit Auguste Choisy (1904). De même, il est parfaitement compatible avec l'arithmétique (dite de sommations) de l'époque (Couchoud, 1993).

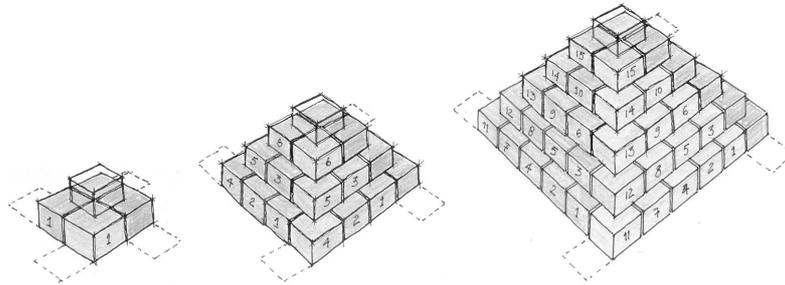


Figure 8. Modélisation du procédé « d'accroissement pyramidal », par enveloppes successives, à partir d'un pyramidion élémentaire (4+1) au centre de la base, face par face, bloc par bloc selon l'algorithme. Les blocs sont à base carrée sur le schéma pour simplifier la représentation

Ce procédé est aisément modélisable, avec des éléments plus ou moins standardisés (briques, morceaux de sucre) ou par simulation informatique. Il ne génère que de la pyramide, il est interactif et prédictif.

Quant à la machine, elle reste à définir précisément et à tester en vraie grandeur. La maquette de la figure 6 propose un trépied simple et robuste qu'on appuie contre le bloc de l'assise supérieure pour en améliorer la stabilité. Il est possible également que cette machine prenne pieds sur deux assises successives. Le contrepois nécessaire à la levée d'un bloc de 2,5 tonnes pourra être fourni par les ouvriers eux-mêmes qui pourront s'accrocher au bras de levier, plutôt que par une charge statique qu'il faut modifier en permanence comme le proposait J. P. Adam (figure 2).

3.1. Le modèle est interactif

Le procédé permet en effet de réaliser au fur et à mesure de l'érection de la pyramide, l'ensemble des dispositifs intérieurs de la pyramide de Khéops : chambres, couloirs (horizontal, ascendant et descendant), grande galerie et conduits de ventilation, leurs formes et emplacements étant corollaires du système constructif.

Par anticipation de la construction (en application du système) sur la face nord, on peut réaliser un faisceau de plans inclinés (rampes) parallèles et superposés dans lequel, au moment opportun, on peut ménager un couloir et/ou une galerie (figures 9 et 10). Les monolithes de granite (et de calcaire) de la chambre du roi seront alors hissés par glissement, à ciel ouvert, sur ce faisceau de rampes. Le couloir ascendant et la grande galerie sont les témoins archéologiques de ce dispositif.

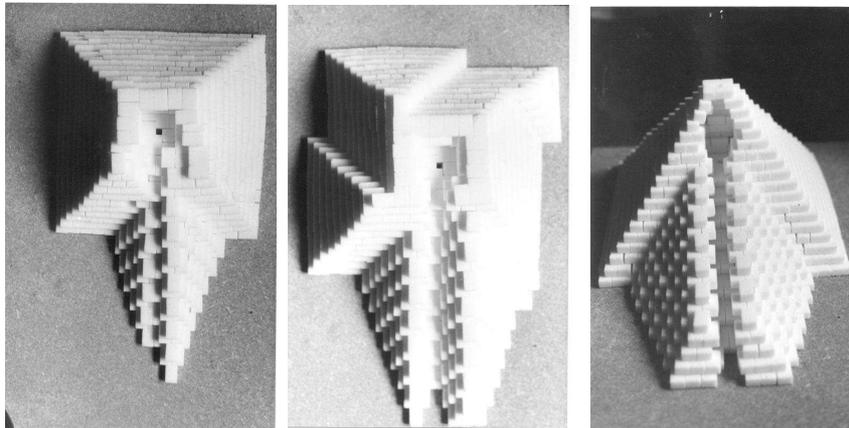


Figure 9. Illustration de l'anticipation sur une face permettant de réaliser chambres et couloirs qui seront ensuite englobés dans l'ouvrage par la poursuite de la construction sur toutes les faces (© P. Crozat)

Par son profil comportant une glissière centrale, des banquettes latérales et des mortaises régulièrement disposées tout au long, formant une sorte de crémaillère (figure 11a), la grande galerie doit être comprise comme un « extraordinaire ascenseur oblique » ayant permis de hisser les monolithes formant la chambre du roi et les arcs de décharge au moyen d'un contrepoids formé par les futurs blocs-tampons de granite (5 ou plus, de 6 tonnes chacun environ) reliés entre eux au moment de l'ascension (figure 11) par une corde de 160 m maximum (le bateau de Khéops, retrouvé près de sa pyramide, témoigne de la parfaite maîtrise des cordages). Ces blocs serviront ensuite à l'obstruction du couloir ascendant (d'où leur

appellation de blocs tampons) où ils ont été découverts par la sape d'Al Mamoun en 827 (figure 11b).

Les herses de l'antichambre (figure 12), montées sur rouleaux comme cela est toujours bien visible, serviront alors à réarmer le dispositif (chacun des blocs tampons individuellement). On constate en effet que le poids des 3 herses est sensiblement le même que celui d'un bloc-tampon tandis que la course qu'elles permettent d'obtenir en un mouvement correspond à l'intervalle entre les mortaises de la grande galerie.

Les monolithes de granite (considérés à tort comme des arcs de décharge, seul le dispositif supérieur en chevron remplit ce rôle) constituent un dispositif de rehausse (figure 10) dans le but de porter l'arc de décharge en calcaire (sollicité à la compression), à la bonne hauteur afin que la descente de charge ne pousse pas au vide de la grande galerie, mettant ainsi en péril l'équilibre et la pérennité de ce dispositif. Cette disposition des monolithes de rehausse (le granit étant imposé par sa meilleure résistance à la flexion pour une portée de 5,25 m), loin d'être une erreur comme le suggère Kérisel (1991), est en effet plus léger (pleins additionnés aux vides) qu'un massif plein en calcaire.

Tous ces dispositifs seront ensuite englobés dans la pyramide par la poursuite de la construction sur les quatre faces.

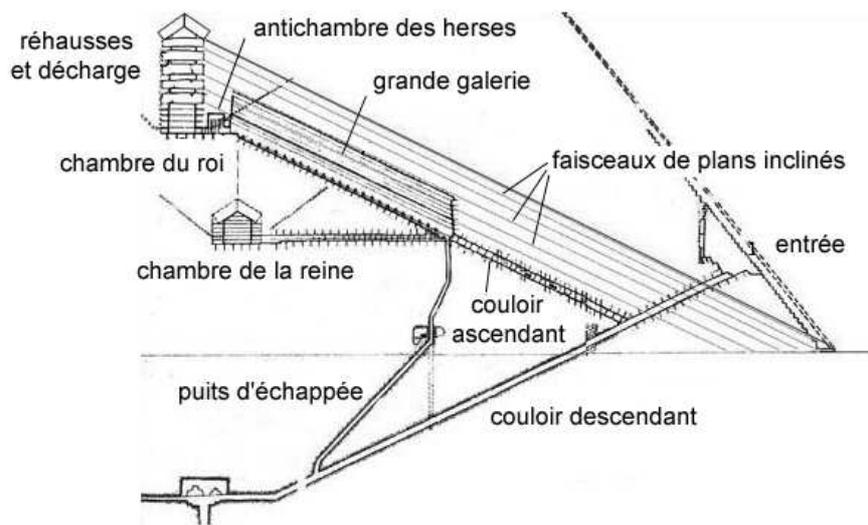


Figure 10. Le faisceau de plans inclinés permet de mettre en place, par glissement, l'ensemble des monolithes de la chambre du roi, des 5 rehaussements et de l'arc de décharge qui correspond au dernier plan incliné possible depuis le pied de la pyramide

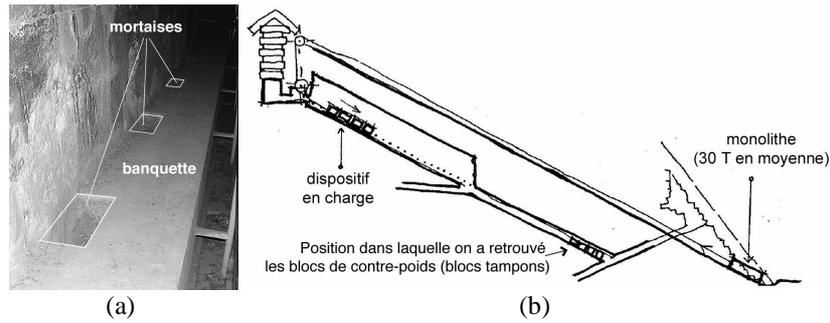


Figure 11. La grande galerie, un « extraordinaire ascenseur oblique »
 a) crémaillère (mortaises, © T. Verdel), b) contrepoids (les futurs blocs-tampons), en charge

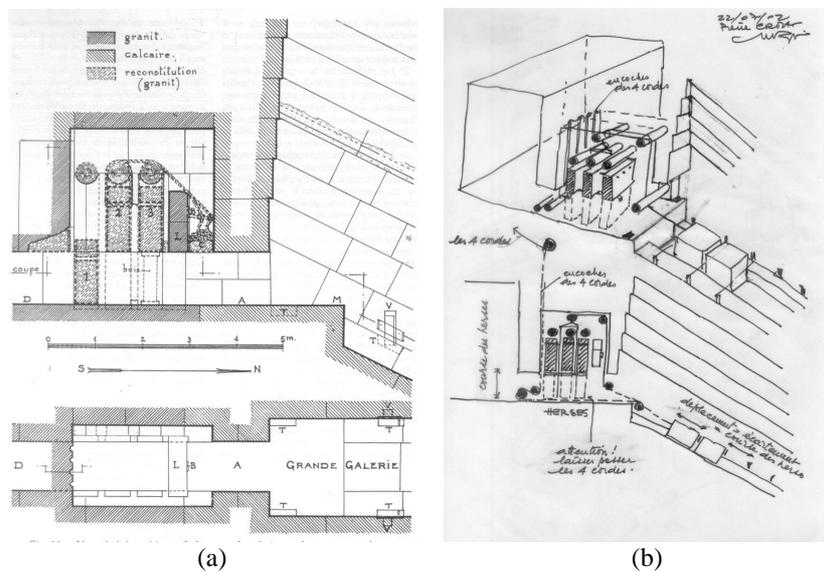


Figure 12. a) dessin de l'antichambre des herses par J. P. Lauer (1988), b) croquis de son rôle et fonctionnement (recharge du contrepoids) d'après P. Crozat

3.2. Le modèle est prédictif

Par prédictif, nous entendons qu'il impose un certain nombre de dispositions qu'il est possible de vérifier.

Ainsi, les monolithes de l'arc de décharge sont les derniers à pouvoir être mis en place par le faisceau de rampes et l'ascenseur, ils correspondent en effet au dernier plan incliné qu'il est possible d'inclure dans la pyramide, celui qui permet l'acheminement des blocs supérieurs en chevrons. La parallèle au couloir ascendant tirée du pied de la pyramide en est la vérification (figure 10).

L'angle de pente de la pyramide étant donné, l'angle du couloir ascendant est corollaire, imposé par le recouvrement (1/3 et 2/3) des blocs. Pour une pente de $\text{tg}(\alpha)=1,25$ ce qui est le cas de Khéops (la pente de la pyramide est donnée par le rapport hauteur/demi-base qui est égal à 1,25 soit simplement 5/4 et non pas $\sqrt{\Phi}=1,27$, racine du nombre d'or comme certains le prétendent), l'angle β du couloir ascendant est alors tel que $\text{tg}(\beta)=1/2$, ce qui semble bien vérifié.

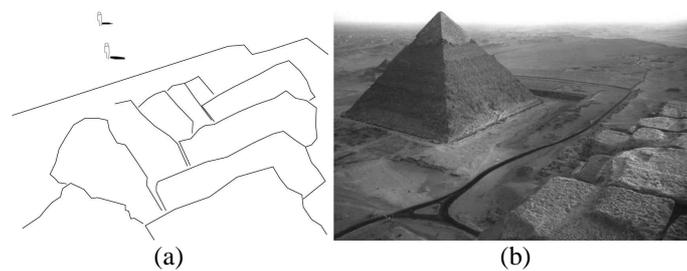


Figure 13. *Disposition des blocs sur l'arête SO : a) restitution à partir d'une image vidéo, b) traces de tailles (© Gérard Civet) sur les blocs du sommet de la pyramide de Khéops (ayant permis d'assiser la pose des blocs de l'enveloppe suivante, aujourd'hui disparue)*

Les blocs d'assises (de proportion moyenne de deux coudées sur trois) doivent être posés en « boutisse » (la longueur étant perpendiculaire à la face considérée, par opposition à « panterresse », parallèle à la face) sur chacune des faces de la pyramide. Il en résulte que chaque arête appartient à l'une des faces et que les blocs d'angles ne peuvent pas être croisés (le croisement des pierres angulaires est un appareillage conseillé en maçonnerie qui offre une meilleure solidité des ouvrages. Ici, ce n'est pas une erreur de construction, mais une impossibilité de mise en œuvre, imposée par le système). Il est alors facile de dégager et de faire tomber ces blocs comme le montre les arêtes écornées des pyramides. Cette disposition imposée est vérifiée (figure 13a).

La juxtaposition et la superposition de blocs de hauteurs différentes impose à chaque bloc mis en place définitivement de lui restituer, par entaille du bloc inférieur, une assise horizontale et plane, pour le bon ordonnancement et la bonne descente des charges, et donc la pérennité de l'ouvrage. Ces entailles sont visibles à plusieurs endroits sur les assises de la pyramide, et particulièrement repérables sur le sommet de la pyramide (figure 13b). Elles constituent même un mode connu

d'appareillage cyclopéen dit « appareil horizontal à décrochement » qualifié « d'appareillage le plus économique » par A. Choisy (1904), figure 14.

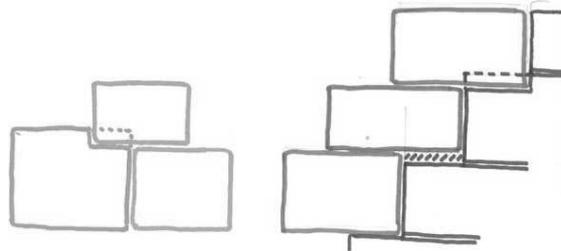


Figure 14. Schéma de l'appareillage horizontal à décrochement sur une face. Les blocs de la nouvelle enveloppe sont assisés par comblement des vides ou la taille du bloc d'assise, dispositions visibles en de nombreux endroits des pyramides

La disposition en boutisse et le recouvrement des blocs sur le sommet écrêté de la pyramide de Khéops est également vérifiée par la restitution optique fournie par E. W. Lane en 1827 (figure 15a, confirmée par des photographies aériennes en notre possession que nous ne pouvons pas publier, cité par Thompson, 2000). Il est dès lors possible de notifier l'appartenance des blocs du sommet à chacune des 4 faces de la pyramide (noter qu'il ne s'agit pas des blocs de l'enveloppe finale qui a disparu à cet endroit, mais des blocs appartenant à une enveloppe interne).

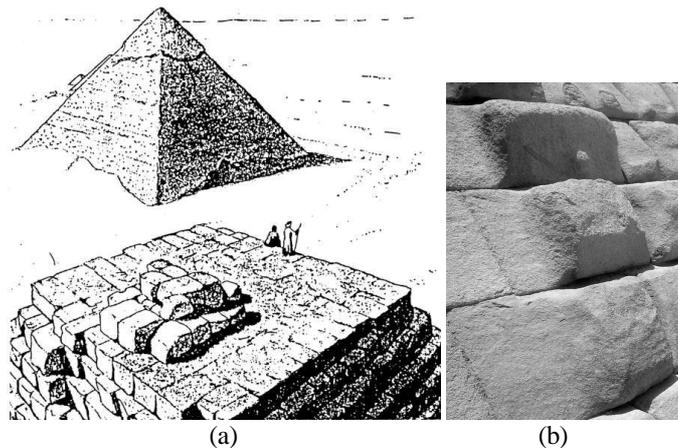


Figure 15. a) restitution optique du sommet écrêté de la pyramide de Khéops due à E. W. Lane en 1827 (Thompson, 2000), b) photographie du ravalement partiel de la pyramide de Mykérinos (© T. Verdel)

Finalement, la pyramide sera revêtue d'une dernière enveloppe, mise en œuvre à l'identique (de calcaire fin, de granite ou de pierre de même provenance) qui sera ensuite ravalée, par abattement des nez de marches des assises, « *la pyramide sera dès lors achevée, en commençant par le sommet* » nous dit Hérodote. En effet ce ravalement exécuté à reculons, du haut vers le bas, aura fait disparaître tous les entablements sur lesquels reposait la machine. Il est alors impossible d'ajouter un quelconque bloc à l'édifice (figure 15b).

4. Hérodote avait peut-être raison

La description faite par Hérodote du mode de construction de la pyramide de Khéops, demeurée hermétique jusqu'alors, est ainsi élucidée et corroborée. Les termes techniques grecs de « *bomides* » (petit autel, socle, piédestal, plate-forme élevée, table, entablement) et « *crossai* » (corbeau, encorbellement, le tout signifiant : « créneau formant escalier », d'après A. Bailly, 1950) sont explicités et signifient respectivement « pierre servant d'appui, formant entablement » et « pierre montant l'escalier, posée en encorbellement ». Chaque bloc sera appelé « *crossai* » quand il gravira l'escalier et « *bomides* » une fois posé à sa place. Il servira alors d'appui au « *crossai* » suivant.

La traduction qui nous paraît la plus explicite du texte d'Hérodote est, de ce point de vue, celle de Andrée Barquet (1964) : « *Voici comment on construisit cette pyramide, par le système des gradins successifs que l'on appelle tantôt krossai, (corbeaux), tantôt bomides, (plates-formes). On la construisit d'abord sous cette forme, puis on hissa les pierres de complément à l'aide de machines faites de courtes pièces de bois : on montait la pierre du sol jusqu'à la première plate-forme ; là, on la plaçait dans une autre machine installée sur le premier gradin, et on la tirait jusqu'au deuxième gradin, où une troisième machine la prenait. Il y avait autant de machines qu'il y avait de gradins, à moins cependant qu'il n'y en ait eu qu'une seule facile à déplacer et qu'on transportait d'un gradin à l'autre, sitôt déchargée (ceci pour indiquer les deux procédés que rapporte la tradition). On acheva donc d'abord le sommet de la pyramide, puis les étages en dessous, l'un après l'autre et l'on finit par les gradins inférieurs et la base de l'édifice.* »

5. Provenance des matériaux

Selon notre postulat, les blocs de calcaire constituant le massif de gros œuvre sont empruntés au plateau de Gizeh, alentour et au plus près, par exploitation directe des strates sub-horizontales du plateau. La vérification de la concordance de la pierre du plateau de Gizeh (calcaire lutécien, éocène moyen, à nummulites) et des trois grandes pyramides et le repérage par vue aérienne des zones d'emprunt sont aisés.

Du point de vue géologique, le plateau de Gizeh, constitué d'un calcaire spécifique qui n'affleure qu'à cet endroit (éocène moyen à nummulites) est un léger

pli anticlinal, résultat d'une déformation tectonique ayant bien évidemment occasionné un système (double) de fracturation naturelle de la roche (Ruhland, 1972) (figure 16) :

- un premier système de fractures larges (diaclasses ouvertes et failles, très facilement repérables) parallèles et perpendiculaires à l'axe du pli tectonique, dû à la flexion ;
- un second système suborthogonal de fractures serrées (diaclasses fermées, système plus dense, plus fin et moins visible) diagonales gauches et droites par rapport à l'axe du pli, dû à la compression.

La carte géologique du Caire et des environs indique l'orientation NE-SW du plissement tectonique et des failles de bordure du plateau de Gizeh, il en résulte que les pyramides de Gizeh sont donc disposées et orientées en fonction de la géologie et de la fracturation naturelle des roches (figure 16) :

- elles sont alignées sur le sommet du pli, parallèlement à l'axe, là où les strates sont quasi horizontales et donc plus aisées à exploiter ;
- elles sont orientées NS et EW en fonction de la fracturation (la plus fine) des diaclasses métriques diagonales par rapport à l'axe du pli.

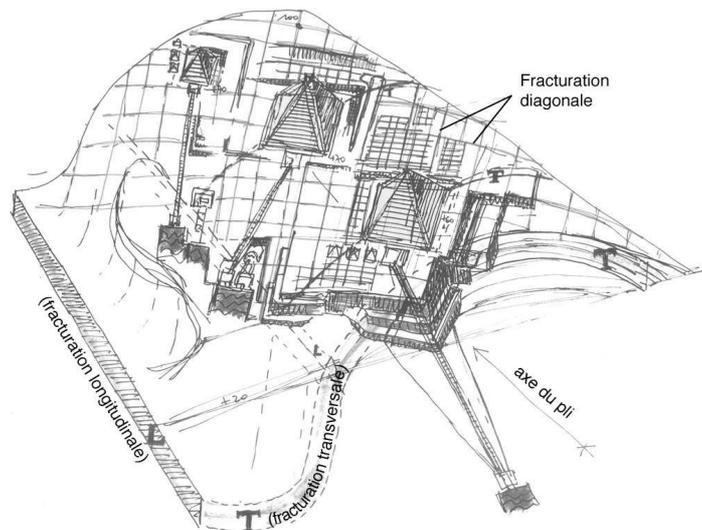


Figure 16. Schéma de principe du double système de fracturation naturelle du plateau de Gizeh



Figure 17. Reliquats de carrières – quadrillage de tranchées déterminant des massifs – a) au pied de la pyramide de Khephren, b) massif redécoupé à l'angle SO de la pyramide de Khéops laissant apparaître les fissurations fines (diaclasses diagonales) (© T. Verdel)

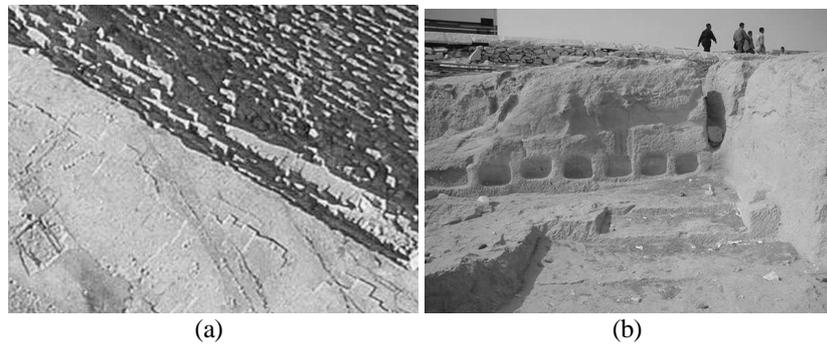


Figure 18. a) photo aérienne du « téménos » de Khéops (© Will et Deni McIntyre, Fotogram Stone), montrant la fracturation primaire transversale (perpendiculaire à l'axe du pli) et l'exploitation de carrière des blocs de pierre selon la fracturation secondaire (diagonale gauche et droite par rapport à l'axe du pli), b) encoches d'exploitation « boîtes de démisage » d'une strate près de la pyramide de Khéops (© T. Verdel)

Aujourd'hui comme hier, nul ne saurait ignorer et ne pas tenir compte de l'orientation, de la géométrie et de la fréquence de ce système de fracturation, sous peine de ne tirer de la carrière que des blocs écornés, difformes ou fissurés, difficiles sinon impossibles à mettre en œuvre. Le mode d'extraction des blocs, en carrière horizontale à ciel ouvert, se fera donc au fur et à mesure des besoins, au plus près (figure 17) et au plus simple, par la réalisation de « boîtes de démisage » où enchâsser directement les extrémités de madriers et de manipuler ces derniers faisant levier pour décoller le bloc (figure 18). Ce bloc se détachera alors de son banc selon

la fracturation naturelle la plus fine (le système des diaclases diagonales dues au cisaillement-compression), les blocs étant pour ainsi dire « prédecoupés » en carrière, ils ne nécessiteront donc qu'un faible travail de taille. Cependant, lorsque les strates sont trop épaisses et donc plus compactes, ce qui est le cas dans l'angle NO de Khephren et SO de Khéops, la technique consistera à dégager des massifs (de 3,5 m de côté environ soit 6 coudées) en creusant au pic un quadrillage de tranchées de largeur d'homme (une coudée) qu'il faudra ensuite redécouper et dédoubler en blocs de taille moyenne (de 2 coudées par 3). L'expérience en carrière, d'après les carriers – tailleurs de pierre de l'AOCDF, montre que de tels massifs se « détendent » en peu de temps des contraintes (de compression) qu'ils subissaient en place, et laissent apparaître alors les fissurations (diaclasses diagonales) les plus fines. De nombreuses encoches sont encore visibles sur le sol de carrière, autour des pyramides (figure 18) et sous certains des blocs mis en œuvre.

6. Continuum technique



Figure 19. a) cairn de Barnenez (carte postale Ed. d'Art JOS, le Doaré, Châteaulin, France), b) aire de battage de Cipierre (© P. Crozat)

En fait, dès le néolithique (figure 19), l'ensemble des édifices de terre ou de pierre tels que cairns, tumulus, dolmens, enceintes fortifiées, ziggourats¹, mastabas, pyramides à degrés, tholos, torres, tombes mycéniennes, stupas, etc., édifices mettant en œuvre des quantités importantes voire énormes de matériaux, avec des moyens techniques d'extraction et de levage des plus rudimentaires, sans échafaudage, participent tous de la même méthode dite « d'accrétion-

1. La racine chamito-sémitique du terme ziggourat « siqqratu » est « s.q.r » qui signifie « être haut » ou peut-être même « s'exhausser ». Il en est de même de la racine de « Saqqarah » puisqu'il s'agit de la même forme, site sur lequel on trouve la première pyramide à degrés d'Égypte.

exhaussement » mise en oeuvre dès le premier épierrement rural (peut-être même issue de cette nécessité de « ramasser les tas ») dû au premier groupe d'agriculteurs.

En effet, cette méthode « d'accrétion-exhaussement » est, au départ et par essence, anthropométrique. L'épierrage d'une pâture ou d'un champ de culture produit des monceaux d'épierrements qui, pour occuper la plus petite superficie possible (surtout dans les vignes), devront être surélevés à la main, le cailloutis étant enserré dans des parements appareillés constitués des plus belles pierres (R. Joussaume, 1985). Tous les dolmens dans le monde semblent avoir utilisé ce procédé, la plupart du temps sur plan circulaire plus ou moins maîtrisé. Le dolmen de la Joselière à Pornic (Loire-Atlantique) offre la particularité d'être sur plan carré et de comporter deux, peut-être trois parées, au point qu'il préfigure de loin les futures pyramides à degrés.

La hauteur et la largeur d'homme constituent la limite anthropométrique de cette méthode de construction. Si l'on veut exhausser davantage le tas, il faut ajouter un parement périphérique (une marche) sur lequel monter, pour continuer l'exhaussement du tas initial, jusqu'à ce que la marche atteigne la hauteur d'homme (et le tas initial, le double de cette hauteur). Ensuite, on ajoutera un deuxième parement et ainsi de suite pour continuer l'exhaussement. Seule l'accrétion périphérique permet l'exhaussement du tas. Elle explicite le schéma de la construction par degrés d'A. Choisy (1904) et impose les parements concentriques et degrés ascendants de ces édifices (figure 20).

Cette méthode a été appliquée aux pyramides à degrés d'Égypte et d'ailleurs et en particulier à celle de Djoser à Saqqarah. Cependant la hauteur des degrés (environ 10 m) nécessitera l'utilisation d'un outil élévateur ou d'un échafaudage ad hoc. Le principe premier « exploiter alentour et foisonner au centre » ainsi que le second « accréter pour exhausser » semblent bien y être respectés : c'est là la seule justification des parées successives qui composent sa structure interne. C'est à l'analyse de cette pyramide à degrés que Richard Lepsius (1943) définira « l'accrétion ». Nous lui préférons le terme « d'accrétion-exhaussement » dans la mesure où l'accrétion n'est motivée que par la volonté d'exhausser l'édifice. Pour autant, la corrélation suggérée par R. Lepsius, entre la longueur du règne du Pharaon et le volume de sa pyramide garde toute sa valeur. Et il n'interdit pas de penser que plusieurs rois aient pu participer au même ouvrage (comme ce fut peut-être le cas pour la pyramide de Meidum). Sous réserve de vérification, cette méthode de construction « par degrés » semble avoir valeur universelle.

Une simulation informatique de cette méthode (figure 20) permet de conjecturer que, qu'elles soient grands ou petits, temples solaires ou pyramides, elles représentent des stades plus ou moins avancés d'un même projet. A l'inverse, la pyramide de Houni-Snefru à Meidoum et celle de Sekhem-khet dite « inachevée », ne sont que deux stades plus ou moins avancés de leur destruction.

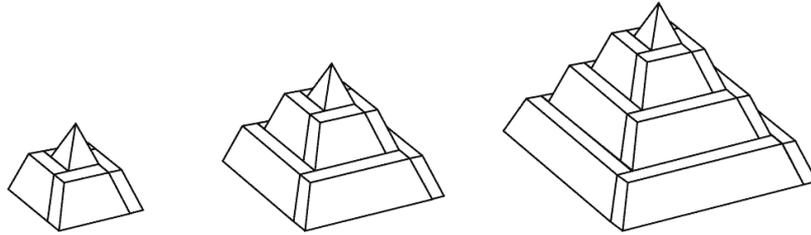


Figure 20. Schéma « d'accrétion-exhaussement » d'une pyramide à degrés quelconque (type pyramide à degrés de Saqqarah)

Jusqu'au mode de pensée, conception et représentation du monde, cosmogonique, théogonique et anthropogonique, comme la notation numérique de l'arithmétique naissante (Ibrah, 1994), tout cela participe du même concept générique d'accroissement par couches successives emboîtées les unes sur les autres, à l'image des pelures d'oignons ou des poupées russes (ou des 3 sarcophages emboîtés de Toutânkhamon), mis en œuvre dans la construction des pyramides, au point qu'il est évident qu'il s'agit là de la seule et unique façon de penser, de concevoir et de représenter.

De la même façon, l'arithmétique additionnelle que Pythagore apprendra des Egyptiens et que le monde grec dédaignera ensuite, n'est que jeu d'additions, de séries et de suites, emboîtées.

Etant donné la conjonction des réalisations, on est même en droit de proposer que la construction ait pu participer sinon générer la structuration de l'écriture et de l'arithmétique, comme le suggère en effet Michel Serres (1993) qui pense que ce mode de pensée, « logistique » ou « algorisme » aura été « esclavagisé » par la vision géométrique « dominante » des Grecs.

7. Conclusion

Partant de l'environnement géologique, de la technique d'extraction des strates, de l'outillage et de la manœuvre de la « machine », puis à travers un modèle interactif et prédictif, le travail succinctement présenté ici propose un système constructif référentiel de mise en œuvre (de type algorithmique) qui génère le concept en même temps que la forme, le génie des pyramides : génie, du grec *geneia*, production-formation. Issu du domaine primordial de l'art de bâtir, voire du vernaculaire, nous pensons qu'il constitue un apport objectif à l'égyptologie et à l'archéologie, capable d'entendre et d'intégrer une connaissance à la fois théorique, pratique et ouvrière.

Si cette thèse apparaît originale, elle prend néanmoins appui sur les intuitions d'A. Choisy, ingénieur-architecte et les observations de R. Lepsius, égyptologue de renom, qu'elle repense, développe et démontre. Guidée par la logique constructive du « si j'avais à construire une pyramide », elle repose sur la géologie de l'ingénieur, l'art de bâtir de l'architecte et le savoir-faire des métiers de la pierre, domaines certes « un peu techniques » pour un littéraire et en dehors du champ habituel de l'égyptologie classique, plutôt apparentée aux sciences humaines.

Le système proposé corrobore et explicite les écrits d'Hérodote, demeurés, paradoxalement, incompris jusqu'alors. L'erreur commise fut de considérer les pyramides en termes d'architecture : concept formel géométrique préalable qu'il faut faire réaliser alors qu'elles appartiennent encore au domaine de génie civil « archaïque », au travers d'une méthode additive d'accroissement d'un « tas » (certes monumental), issue d'une « pratique-pensée ouvrière », méthode qui génère la forme.

Il offre une nouvelle appréhension et compréhension des différents systèmes constructifs des pyramides dans leur évolution et il ouvre sur l'observation d'un « continuum technique » du génie des ouvrages et de l'art de bâtir. Les grandes pyramides apparaissent dès lors comme une « avancée technologique » (par rapport aux pyramides à degrés) du fait de l'invention de la « machine » capable de lever ces blocs cyclopéens. Avant cela, le site de Gizeh (qui fournit de tels blocs) était inexploitable. De la même façon, les pyramides à degrés qui mettent en œuvre des pierres « manportables » sont situées sur des gisements correspondants.

Le débat sur le mode de construction des pyramides s'en trouve ainsi renouvelé, enrichi et objectivé à travers une démarche scientifique, technique et opératoire et une vision généraliste et synthétique des connaissances enseignées dans les écoles et acquises sur le tas.

Et si la pyramide de Khéops y laisse un peu de son « mystère », elle y gagne beaucoup en « génie ».

8. Bibliographie

- Adam J. P., *L'archéologie devant l'imposture*, R. Laffont 1975, 2^e édition 1992.
- Arnold D., *Building in Egypt, Pharaonic Stone Masonry*, 1996.
- Arnold D., *Überlegungen zum Problem des Pyramidenbaus*, MDAIK, 1981.
- Bailly A., *Dictionnaire grec-français*, Ed. Hachette, Paris, 1950.
- Barquet A. (traductrice), *Hérodote, L'enquête, Livre II*, art. 125 et 126, Gallimard, 1964.
- Casevitz (traducteur), *Diodore de Sicile, Naissance des Dieux et des Hommes, Livre I*, art. 63, Les belles lettres, 1991.
- Choisy A., *L'art de bâtir chez les Egyptiens*, Edouard Rouveyre, 1904.
- Couchoud S., *Mathématiques égyptiennes*, Le léopard d'or, 1993.

- Croon L., *Lastentransport beim Bau der Pyramiden*, Hanovre, 1925.
- Crozat P., *Système constructif des pyramides*, Canevas, France, 1997.
- Goyon G., *Le secret des bâtisseurs des grandes pyramides*, Pygmalion, 1977.
- Houdin J. P., Houdin H., « La construction de la pyramide de Khéops : vers la fin des mystères ? », *Annales des Ponts et Chaussées*, n° 101, 2002, p. 76-83.
- Houdin J. P., *Kheops, les secrets de la construction de la Grande Pyramide*, Ed. du Linteau, Farid Atiya Press, 2006, 160 p.
- Ifrah G., *Histoire universelle des chiffres*, R. Laffont, 1994.
- Joussaume R., *Des dolmens pour les morts*, Hachette, 1985.
- Kerisel J., *La pyramide à travers les âges*, Presses Ponts et Chaussées, 1991.
- Lauer J. Ph., *Le mystère des pyramides*, Presses de la Cité, 1988.
- Lepsius K. R., *Über den Bau der Pyramiden (sur la construction des pyramides)*, in *Bericht über die zur Bekanntgabe geeigneten Verhandlungen der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1843.
- Lepsius K. R., *Monuments d’Égypte et d’Éthiopie, 1849-1859. (Denkmaeler aus Ägypten und Äethiopien nach den Zeichnungen der von Seiner Majestät dem Koenige von Preussen, Friedrich Wilhelm IV., nach diesen Ländern gesendeten, und in den Jahren 1842–1845 ausgeführten wissenschaftlichen Expedition auf Befehl Seiner Majestät, 13 vols., Berlin, Nicolaische Buchhandlung, 1849, réédition Genève, Editions Les belles-lettres, 1972.*
- Ruhland M., « Méthode d’étude de la fracturation naturelle des roches associée à divers modèles structuraux », *Recherches sur la fracturation naturelle des roches*, 1969-1972, *Sci. Géol. Bull.*, 1972.
- Serres M., *Les origines de la géométrie*, Flammarion, 1993.
- Stadelmann R., *Die großen Pyramiden von Giza*, Adeva, 1990.
- Strub-Roessler M., *Vom Kraftwesen der Pyramiden*, in *Technische Rundschau*, Berne, octobre 1952-1952.
- Thompson J., *LANE E. W., Description of Egypt : Notes and Views on Egypt and Nubia Made during the Years 1825 - 1828* Edited by THOMPSON J., American University in Cairo, 2000.