

SYSTEME CONSTRUCTIF DES PYRAMIDES : DE LA GEOLOGIE A L'EDIFICATION

CROZAT Pierre, VERDEL Thierry

Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, Ecole des Mines de Nancy, Parc Saurupt, 54042 Nancy Cedex, www.laego.org, pierre.crozat@free.fr, thierry.verdel@mines.u-nancy.fr.

RESUME : Les pyramides d'Egypte sont construites de matériaux empruntés alentour. L'analyse des caractéristiques géologiques des sites d'implantation permet d'ordonner et d'explicitier l'évolution des procédés de leur construction qui participent d'un continuum technique de l'Art de Bâtir. La grande pyramide de Kheops, la plus énigmatique du fait de ses dispositifs intérieurs, se trouve être en fait la plus révélatrice du « système constructif des pyramides » et la Grande Galerie doit être considérée comme un « extraordinaire ascenseur oblique ». Les observations archéologiques in situ constituent alors autant d'éléments de preuve de l'utilisation du procédé « d'accroissement pyramidal », procédé qui corrobore, en tous points, les écrits d'Hérodote demeurés hermétiques jusqu'alors..

MOTS-CLEFS : pyramides, système constructif, art de bâtir, continuum technique, géologie.

ABSTRACT : Egyptian pyramids are built with surrounding materials. The analysis of the geological features of their location helps in ranking and explaining the evolution of construction processes, which are participating to a technical continuum in the Art of Building. The « mysterious » Great Pyramid of Kheops reveals, in fact, the process of pyramidal growth and the Great Gallery must be understood as an extraordinary oblique lift. Archaeological observations are providing proofs of the use of this process, which corroborates the writings of Herodotus, remained impenetrable until now.

KEY-WORDS : pyramids, building system, art of building, technical continuum, geology.

1. Introduction

Dans le contexte médiatique actuel de l'Egyptologie, est-il encore possible d'éclairer l'énigme du mode de construction des pyramides, de soumettre des solutions (à l'opposé de la culture du « Mystère ») reposant sur des domaines de connaissances techniques, au travers d'une démarche scientifique, technique et opératoire guidée par l'exercice pratique de l'architecte et de l'ingénieur ? C'est pourtant ce que nous proposons de présenter ici : un système constructif commun à toutes les pyramides et plus généralement à tous les ouvrages tumulaires, corroboré par des observations in situ, s'inscrivant dans un continuum technique et dont la modélisation ouvre des perspectives d'investigation approfondies.

2. Sciences de la terre et Art de bâtir

Construites sur Terre, de mains d'homme, avec des matériaux empruntés au sol, les pyramides d'Egypte constituent une « énigme » sur le sujet de leur construction, dont la résolution relève par essence des domaines des Sciences de la Terre et de l'Art de Bâtir. Partant du postulat que l'environnement géologique – au sens large du terme – des constructions historiques détermine le « système constructif » mis en œuvre pour leur édification, nous allons montrer que chaque procédé

rencontré relève d'un même « principe générique » qui, par son évolution en fonction de l'outillage constitue un « continuum technique », issu du Vernaculaire.

2.1. Environnement et matériaux.

Les pierres constitutives des pyramides d'Égypte sont manifestement empruntées alentour à l'Environnement proche. Les reliquats de carrières et les zones d'emprunt, repérables sur le site de Guizéh, l'attestent en particulier pour les trois grandes pyramides de Khéops, Khéphren et Mykérinos. Il en est sans doute ainsi de la plupart des édifices tumulaires. Ce principe vernaculaire de l'utilisation des ressources locales semble des plus logiques. Il est confirmé en ce qui concerne les ouvrages du génie civil, militaire et rural dont les exemples ne manquent pas. Les sites d'implantation sont d'ailleurs souvent choisis pour la possibilité voire la plus grande facilité d'extraction de ces matériaux. En serait-il différemment des ouvrages religieux comme le sont les pyramides ?

2.2. Géotechnique et géomécanique.

Les caractéristiques géologiques (tectonique, stratification, fracturation naturelle des roches, dimensions et poids, dureté et durabilité) des matériaux fournis par les différents gisements déterminent les techniques d'extraction en carrières, de transport et de mise en œuvre appropriées. Les pierres, de tailles et de poids différents, imposent à l'évidence des techniques et des méthodes de mise en œuvre différentes, des systèmes constructifs adaptés, mais qui peuvent appartenir au même principe général. Dans la grande pyramide de Kheops, la mise en œuvre des monolithes de granite de 30 tonnes en moyenne, de la chambre du roi et des chambres de rehausse supérieures, ne sauraient relever de la même technique que celle utilisée pour les blocs de calcaire du gros-œuvre empruntés sur place ; cette confusion des genres a fait s'affronter les deux grandes théories, « machiniste » et « rampiste », depuis l'Antiquité.

3. Art de bâtir et procédés constructifs

Le principe constructif général des ouvrages tumulaires peut se résumer ainsi : « exploiter alentour pour construire au centre, par étapes successives d'accroissement, en pelures d'oignon, à partir d'un noyau (éventuellement une chambre en encorbellement) placé au centre de la base ». Il est issu des premières constructions mineures du Néolithique et son évolution peut être ordonnée en un continuum technique qui dépend de l'outillage disponible ou à concevoir et des manœuvres imposés par les caractéristiques des gisements respectifs.

3.1. Le mode générique de la construction par degrés

Le mode générique de la construction par degrés est reconnaissable dans les premières constructions du Néolithique : oppida et enceintes fortifiées, cairns et dolmens. On peut le découvrir aussi dans des réalisations rurales : murs de culture en terrasse, épierrements ruraux et baraques de bergers. Les murs de soutènement des cultures en terrasse obéissent à des règles constructives simples : emprunt sur place, fruit du mur, appareillage à rupture de joints, hauteur maximum d'homme et si nécessaire, « accrétion » d'un mur en pied pour « exhausser » le précédent. La méthode dite « d'accrétion-exhaussement » est récurrente. Elle « génère » la construction, par enveloppes successives, par degrés anthropométriques. De nombreux exemples datant de la

préhistoire relèvent de cette méthode. On citera par exemple : le rempart d'Etaule (Côte d'Or), les tumulus de Bougon (Deux-Sèvres), le cairn de Barnenez (Finistère), le dolmen de la Joselière à Pornic (Loire Atlantique) et même les barracas de Minorque du siècle dernier (figure 1). Les degrés n'ont donc pas pour « raison » de conforter, d'étayer ou de contrebuter le noyau central de départ comme l'idée en est souvent répandue, voir par exemple (Joussaume, 1985). Ils constituent le mode générique de l'ouvrage, servant à la fois d'échafaudage pour s'y tenir à pied d'œuvre et pour approvisionner les matériaux à empiler.



Figure 1 : Tumulus de Bougon (Deux Sèvres, photo P. Crozat) et barraca à Minorque (photo Augusto Petchen).

3.2. Le procédé « d'accrétion-exhaussement » des pyramides à degrés de la III^{ème} dynastie

Toutes les pyramides à degrés en Egypte sont réalisées suivant ce même procédé, par adjonction de parées qui constituent les étapes successives d'avancement de la construction. Il en est ainsi, par exemple, des petites pyramides de El-Kôlah et de Zaouiêt el-Maïétîn, des temples solaires, des phases successives (d'accrétion-exhaussement) de la pyramide de Meïdoun, des reliefs des tranches des pyramides (démolies) de Sekhemkhet ou de Zarouiêt el-Aryân ainsi que de la pyramide de Djoser à Saqqarah. Cependant, dans ce dernier cas en particulier, la hauteur des degrés (de l'ordre de 9 m), leur largeur (environ 3,5 m) et leur composition en plusieurs parées (figure 2), impliquent l'utilisation d'une machinerie élévatrice (à balancier) ou d'une sorte d'échafaudage sommaire, restreint et temporaire, qui reste à identifier. En Amérique Centrale, le mode de construction des pyramides à degrés amérindiennes semble également apparenté à ce procédé.

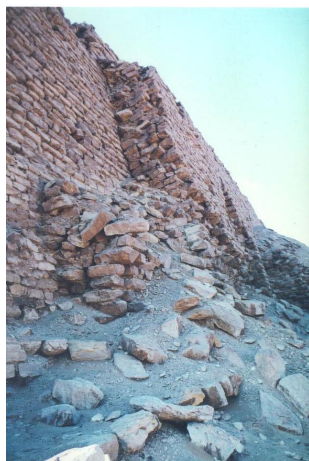


Figure 2 : Parées successives de la pyramides de Djoser à Saqqarah (photo Eric Guerrier)

3.3. Le procédé « d'accroissement pyramidal » des grandes pyramides lisses de la IV^{ème} dynastie

Le procédé de construction des grandes pyramides lisses de la IV^{ème} dynastie (essentiellement à Dashour et Gizeh) peut être considéré comme l'adaptation ou l'évolution de « l'ancienne » méthode « d'accrétion-exhaussement » afin de permettre la mise en œuvre de blocs cyclopéens, d'environ un mètre cube, fournis par le gisement sous-jacent, par exploitation des strates. L'extraction des blocs sera conduite à partir d'un quadrillage de tranchées de largeur d'homme (une coudée) dont on trouve des reliquats au pied des pyramides de Khéphren, de Khéops et de Mykérinos (figure 3). A l'angle sud-ouest de la pyramide de Kheops, une portion de carrière ouverte permet de comprendre le mode de « démisage » des massifs de pierre préalablement découpés par les tranchées (figure 4). On les décollait probablement à l'aide de madriers faisant levier, appliqués dans des sabots entaillés à niveau. Ces massifs étaient ensuite découpés (selon la fracturation) en plusieurs blocs propres à être débardés, transportés et mis en œuvre. La manœuvre de tels blocs nécessitait l'utilisation d'outils et de machines appropriés. Avant l'invention et la maîtrise de cet outillage, le site de Gizeh ne pouvait donc être utilisable pour y construire une pyramide selon l'ancienne méthode, les anciens Égyptiens se refusant à débiter des petits parpaings dans les blocs cyclopéens extraits des strates du plateau de Gizeh. Inversement, les pyramides d'Abousir, bien que postérieures aux grandes pyramides lisses, seront construites selon l'ancienne méthode à degrés et ensuite lissées par comblement des degrés (que l'on aperçoit aujourd'hui à cause de l'érosion) du fait qu'elles sont situées sur un gisement qui ne fournit que ce type de parpaings.



Figure 3 : Carrières de Khéphren, Khéops et Mykérinos (de gauche à droite, *photos T. Verdel*)



Figure 4 : Encoches pour le « démisage » des massifs de pierre dans la carrière de la pyramide de Kheops. (*photo T. Verdel*).

3.3.1 Tectonique et fracturation naturelle des roches

Le plateau de Guizeh forme un anticlinal. Par un plissement tectonique, les strates ont été fracturées naturellement. La carte géologique nous montre des failles de bordure, d'orientation NE-SW, qui symbolisent l'axe du pli dans la même direction. Il s'en déduit un double système classique de fracturation naturelle plus fine (Ruhland, 1972) d'orientations N-S et E-W (figure 5). Aujourd'hui comme hier, nul ne saurait faire fi de cette fracturation sous peine d'extraire des blocs qui ne tarderont pas à se fendre et l'orientation des tranchées (des reliquats de carrières visibles autour des 3 grandes pyramides du plateau) se conforme à l'orientation du réseau de diaclases diagonales plus denses, théoriquement orienté dans ces directions. Les trois pyramides de Guizeh sont ainsi alignées parallèlement à l'axe du pli, en bordure de la faille longitudinale au sud, et elles sont orientées selon la fracturation diagonale, c'est-à-dire selon les points cardinaux. Si les interprétations théologiques régulièrement réitérées, qui voudraient que les pyramides, et particulièrement les trois grandes, soient orientées selon les astres, voir par exemple (Gingerich, 2000) restent permises, il est rassurant pour le constructeur, à défaut d'être obligatoire, que les pyramides aient précisément cette orientation.

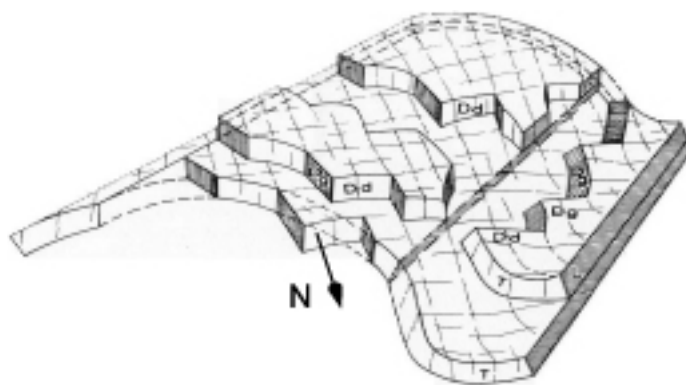


Figure 5 : Schéma de principe de la fracturation des roches sous l'effet d'un plissement (d'après Ruhland, 1972). Le Nord indiqué correspond à celui du plateau de Guizeh quand on établit la correspondance.

3.3.2 Système constructif : algorithme et modélisation

Compte tenu de leur volume et de leur poids, la mise en place des blocs des pyramides de Guizeh nécessite l'utilisation d'une machine capable de les élever et de les mettre en place. On l'aura fait selon le système constructif dit « d'accroissement pyramidal », bloc par bloc, face par face, par enveloppes successives emboîtées les unes dans les autres, à partir d'un pyramidion au centre de la base (comme pour les pyramides à degrés). Cette méthode récurrente purement additionnelle et répétitive est basée sur un mouvement élémentaire consistant à élever et poser un bloc sur deux autres, à rupture de joints. Le bloc-montant étant posé en « encorbellement », décalé vers l'intérieur par rapport aux blocs-supports, il ménage alors un « entablement » extérieur sur lequel reposer la machine élévatrice, pour l'ascension des blocs suivants. Ce mouvement élémentaire constitue un algorithme, sur la base duquel l'ensemble du système constructif est aisément modélisable (figure 6).

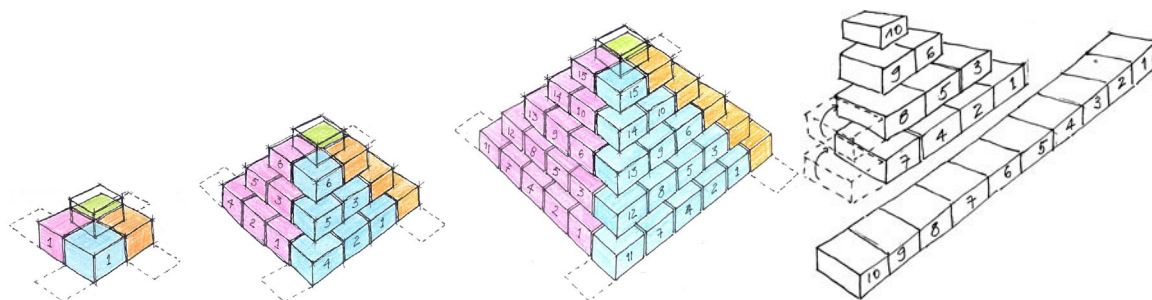


Figure 6 : Principe de la construction par enveloppes successives et détail du montage d'une face (à droite).

3.3.3 Machine faite de courtes pièces de bois

La machine élévatrice, simple, de fabrication économique et facile de manœuvre (une sur chaque assise ou une seule facile à déplacer) pourrait être un bras de levier posé sur un trépied, lui-même installé sur l'entablement de chacune des assises. Le trépied devrait offrir un point d'appui à une hauteur d'environ 1,5 m. Le calcul et l'expérimentation donnent par ailleurs un bras de levier de 5 m de long et de 18 cm de diamètre. Les blocs (parallélépipédiques en proportions d'environ 3 en longueur pour 2 en largeur et 1,25 en hauteur) seront posés « en boutisse » sur chaque face, c'est-à-dire perpendiculairement à la face considérée (figure 7). Ils reposeront ainsi sur deux cotés, dans une arête rentrante, quand ils grimpent le créneau en escalier.

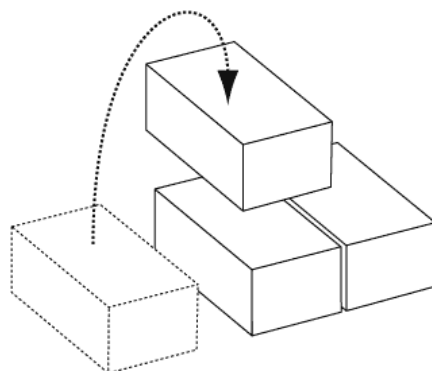


Figure 7 : Schéma de principe de la pose des blocs dans le système d'accrétion-exhaussement.

3.3.4 Modélisation interactive et prédictive

Aujourd'hui comme hier, un tel « système constructif » peut être modélisé manuellement avec des briques. Mais la modélisation informatique a l'intérêt d'offrir une simulation cinétique. Cette dernière permet d'imaginer et de développer des stratégies de construction correspondant aux dispositifs intérieurs de la pyramide de Kheops : par anticipation de la construction sur la face nord (figure 8), on réalise une rampe ou un plan incliné (puis tout un faisceau de plans inclinés parallèles et superposés) qui serviront à hisser par glissement, à ciel ouvert, les monolithes de granit de 30 tonnes (en moyenne) de la Chambre du roi. Sur la première de ce faisceau de rampes, en omettant de poser les blocs supérieurs, on réalise un couloir ascendant ou une grande galerie (par encorbellement). L'ensemble des dispositifs intérieurs est ensuite englobé dans la pyramide par la poursuite de la construction sur les quatre faces. Les dispositifs intérieurs de la pyramide de Kheops sont ainsi corollaires du « système constructif des pyramides » (Crozat, 1997), car ils sont nécessaires à la mise en œuvre des monolithes de granite de la chambre du Roi.

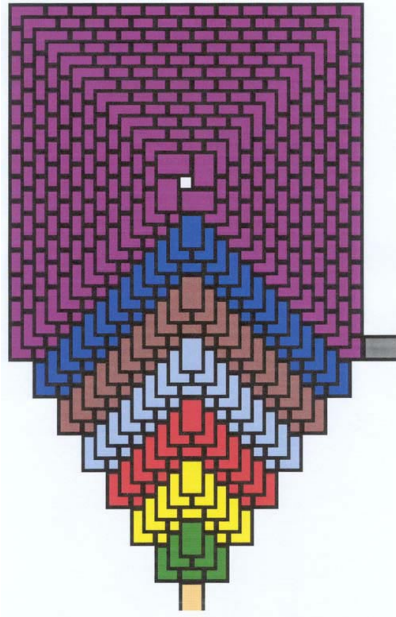


Figure 8 : Anticipation de la construction sur une face pour construire une rampe permettant de hisser les monolithes de granite de la chambre du roi. La rampe sera ensuite englobée dans la construction par la poursuite de l'accrétion (*image de simulation informatique*).

La modélisation est également prédictive puisqu'elle impose des dispositions particulières aux blocs, dans et sur la pyramide. Il en est ainsi du sommet actuellement écrêté de la pyramide de Khéops, dont la disposition des blocs, en boutisse, pour chaque enveloppe, est respectée comme le montre la restitution optique (figure 9) établie par E.W. Lane en 1827 confirmée par les photographies aériennes. Il en est de même sur les arêtes (figure 10). Sur les faces, les blocs n'étant pas tous de même épaisseur, il est nécessaire, pour une bonne assise, d'entailler le bloc d'appui le plus épais à la demande, ces entailles systématiques constituent le mode d'appareil dit « appareillage horizontal à décrochement », « le plus économe » selon A. Choisy (Choisy, 1904).

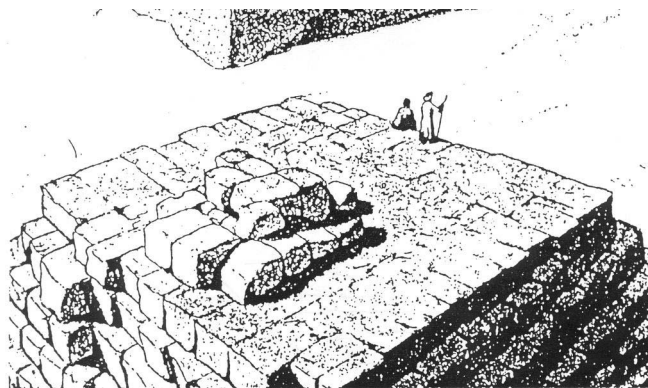


Figure 9 : Restitution optique du sommet de la pyramide de Kheops faite par Edouard William Lane en 1827 (Lane 2000)

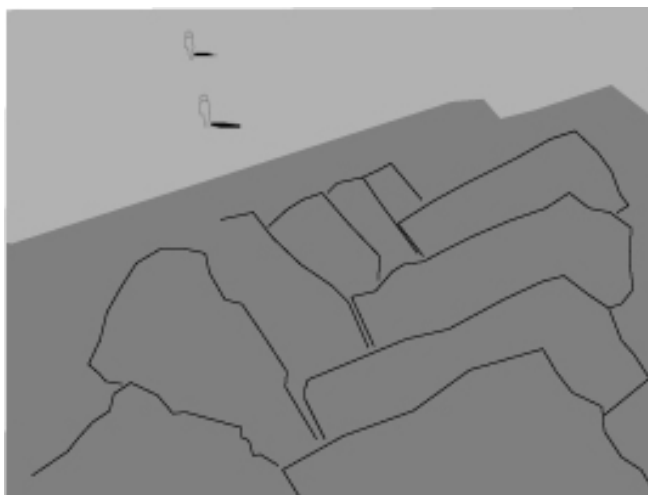


Figure 10 : Une des arêtes de la pyramides de Khéops. Restitution faite par les auteurs à partir d'une image télévisuelle.

A l'angle de pente $\alpha = 52^\circ$ de la pyramide (soit $\text{tg}(\alpha) = 1,25$), et suivant un mode de recouvrement de 2/3 (en moyenne), correspond corollairement l'angle $\beta = 26^\circ$ du couloir ascendant et de la grande galerie ($\text{tg}(\beta) = 0,5$) (figure 11).



Figure 11 : Schéma montrant comment, par omission de certains blocs, on obtient la pente de la grande galerie corollairement à celui de la pyramide (*image de simulation informatique*).

3.3.5 La Grande Galerie : un ascenseur oblique.

L'utilité de la Grande Galerie, longue de 41 m et haute de 9 m, construite en encorbellement, a suscité les interprétations les plus fantaisistes. Or il a fallu hisser les 52 monolithes de granite (de 30 t en moyenne) de la Chambre du Roi par glissement sur le faisceau de plans inclinés parallèles et superposés de pente 26° construit par anticipation. Le premier de ces plans correspond au Couloir Ascendant. Le dernier, qui se prolonge jusqu'au pied de la pyramide, permet la mise en place de l'arc de décharge en V renversé, du sommet. La Grande Galerie peut dès lors être considérée comme l'espace de manœuvre d'un contrepoids constitué de 5 ou 6 (ou plus) futurs blocs-tampons, comprenant une glissière centrale, des tablettes et une crémaillère latérales (mortaises). Elle constitue ainsi *un extraordinaire ascenseur oblique* servant à l'ascension « en rappel » de chacun des 52 monolithes de granite, par équilibre des forces, pour autant que chaque monolithe et leur contrepoids soient reliés ensemble par un système de liaison inverse. Les 4 encoches de cordes et

les 3 paliers de rouleaux visibles dans l'Antichambre (figure 12), ainsi que les mortaises dans les tablettes latérales de la grande galerie servant au blocage de la crémaillère, seraient les vestiges d'un tel dispositif. On imagine aisément ce fonctionnement mécanique, presque horloger, qui permet par la décomposition et ensuite l'addition des forces, de soulever les charges imposantes, encore aujourd'hui.



Figure 12 : Encoches de passage de cordes et paliers de rouleaux visibles dans l'antichambre de la pyramide de Kheops (photos T. Verdel)

3.3.6 Le ravalement final

Les grandes pyramides lisses sont revêtues d'une dernière couche-enveloppe (tous les auteurs en conviennent voir par exemple (Lauer, 1988)) qui peut être d'une autre extraction (calcaire blanc de Tourah pour Khéops, calcaire local et granite pour Khéphren, granite pour Mykérinos) mise en place de la même façon que les précédentes. Elle sera ensuite ravalée, en cassant les nez d'assises, du haut en bas, ce qui interdira toute poursuite de la construction.

3.4. Le procédé « *backing - stones* » des pyramides à textes des V et VI^{èmes} dynasties

Ce procédé se caractérise par la présence d'enveloppes successives constituées de gros blocs de calcaire local, « *backing - stones* » (Labrousse, 1996), mis en place à l'aide de la « machine » dès lors connue, enserrant, à chaque phase d'accroissement, un cailloutis tout venant de parpaings plus ou moins grossiers. Elles sont enfin revêtues d'une couche-enveloppe de blocs calcaires qui sera lissée par ravalement. La reconnaissance de l'environnement géologique devrait expliciter, par leur présence, la fourniture et l'utilisation de ces deux types de matériaux. Cet environnement semble correspondre notamment à un épais banc de calcaire compact surmonté d'une couche de découverte de roches (à parpaings), aux strates plus fines et beaucoup plus fracturées par l'érosion.

3.5. Le procédé « à ossature » des pyramides de briques de la XII^{ème} dynastie

Situées au milieu ou en bordure proche de gisements d'argile, les pyramides de briques de la XII^{ème} dynastie sont de fait très ruinées, au point qu'il est difficile d'appréhender correctement leur mode de construction. Celle de Sésostri I^{er} à Licht semble parcourue d'un système médian et diagonal de murs de pierre en ossature du massif de brique crue (Lauer, 1988).

4. Conclusion

Trop éloignées du principe d'économie d'effort de l'Art de bâtir, les différentes théories avancées jusqu'alors pour expliquer la construction des pyramides, ne peuvent satisfaire le praticien. Comme celle de tout édifice tumulaire, la construction des pyramides relève essentiellement du principe vernaculaire selon lequel un ouvrage s'inscrit dans et dépend de son environnement géologique. Les sites d'implantation qui induiront les formes architecturales résultantes, seront donc investis en fonction de l'évolution technologique de l'outil et de la maîtrise des manœuvres. L'ensemble des observations archéologiques, in situ, autour, sur et dans toutes les pyramides d'Egypte, constitue autant d'éléments de vérification de la faisabilité du principe général énoncé « exploiter alentour pour foisonner au centre par enveloppes successives ». Depuis l'Antiquité, deux familles de théories de construction de la grande pyramide s'opposent, « rampistes » à l'instar de Diodore de Sicile (Casevitz, 1991) parlant de « levées de terre » contre théories « machinistes » à la suite des écrits d'Hérodote (Barquet, 1964) parlant de « machine faite de courtes pièces de bois ». Aujourd'hui une troisième famille de théories « mixtes » (Adam, 1975), (Kérisel, 1991) et (Stadelmann, 1990) tente d'éviter les inconvénients des précédentes, sans bien connaître ni convaincre.

Le texte d'Hérodote - demeuré hermétique jusqu'alors - se révèle en fait particulièrement technique et précis : les deux termes, « bomides » (pierres d'appui formant en entablement) et « crossai » (pierres qui grimpent posées en encorbellement), étant élucidés : en fait les blocs changent d'appellation suivant leur fonction et forment un créneau en escalier. Il révèle une méthode constructive additionnelle et répétitive, compatible avec les mathématiques égyptiennes de l'époque (Couchoud, 1993) qui relèvent du même principe générique.

La pyramide de Khéops avec ses 2.6 millions de m³, la plus énigmatique des pyramides d'Egypte est en fait la plus révélatrice du « système constructif des pyramides », du fait de ses dispositifs intérieurs qui n'ont de sens que dans ce cas. Ce qu'elle y perd ici en « Mystère », elle le gagne en « Génie ».

5. Références

- Adam J.P. L'archéologie devant l'imposture. Robert Laffont, 1975
- Barquet A. (traductrice), HERODOTE, L'Enquête, Livre II, Art 125 et 126. Gallimard, 1964
- Casevitz (traducteur), DIODORE de Sicile, Naissance des Dieux et des Hommes, Livre I, Art LXIII. Les belles lettres, 1991.
- Choisy A. L'Art de bâtir chez les Egyptiens. Edouard Rouveyre Editeur, 1904
- Couchoud S., Mathématiques égyptiennes. Le Léopard d'Or, 1993
- Crozat P. Système constructif des pyramides. Canevas Editeur, 1997.
- Gingerich O., Plotting the Pyramids. Nature, vol 408, 16 November 2000, 297-298.
- Goyon G., Le secret des bâtisseurs des grandes pyramides. Pygmalion, 1977.
- Joussaume R., Des Dolmens pour les Morts. Hachette, 1985
- Kérisel J., La pyramide à travers les âges. Presses Ponts et Chaussées, 1991.
- Labrousse A., L'architecture des pyramides à textes, 2 vol, Bibliothèque d'étude, IFAO, Le Caire, 1996

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, ISBN : 9774245253, 2000.

Lauer J.P., Le mystère des pyramides. Presses de la Cité, 1988.

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.

Stadelmann R. Die großen Pyramiden von Giza. Adeva, 1990