

Frank Müller-Römer

**Résultats sur la construction des pyramides
dans l'Ancien Empire**

Erschienen 2020 auf Propylaeum-DOK

URN: urn:nbn:de:bsz:16-propylaeumdok-47160

DOI: <https://doi.org/10.11588/propylaeumdok.00004716>

URL: <http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/propylaeumdok/volltexte/2020/4716>

Résultats sur la construction des pyramides dans l'Ancien Empire

Dans le passé, de nombreuses hypothèses sur la construction des pyramides dans l'Égypte ancienne ont été émises par des égyptologues, des ingénieurs et des architectes de renom. Dans cet article, des considérations et des constatations fondamentales sur la construction des pyramides sont expliquées. Par la suite, une proposition de construction des pyramides dans l'Ancien Empire est présentée, basée sur ces considérations.

1. Introduction

L'espérance de vie moyenne des habitants de l'Égypte ancienne était d'environ 35 ans. Malgré le haut niveau de la médecine humaine, de nombreuses inflammations ont été mortelles, surtout après des blessures. Même dans des conditions d'hygiène de vie supérieures à la moyenne, avec d'excellents soins médicaux et la meilleure nutrition, les rois et les hauts fonctionnaires ont été touchés par des maladies inattendues aux conséquences fatales.

Sur les 22 rois de la 3e à la 6e dynastie auxquels on peut attribuer des pyramides, au moins six sont morts avant l'achèvement de leurs tombes : Sekhemkhet, Khaba, Djédefrê, Baka, Chepseskharê et Néferfrê.¹ Chaque roi a donc probablement ordonné au début de son règne de compléter son tombeau dans les plus brefs délais. Cette directive a ensuite déterminé le processus de construction. La priorité absolue était donc le délai minimum pour l'achèvement de la pyramide prévue.

2. Les déclarations fondamentales

Comme on peut le voir sur la figure 1, en prenant le volume de la pyramide de Khéops comme exemple, environ 70% des matériaux de construction sont utilisés dans le tiers inférieur : À une hauteur de 50 m, le volume de pierre restant est de 28,6 %.²

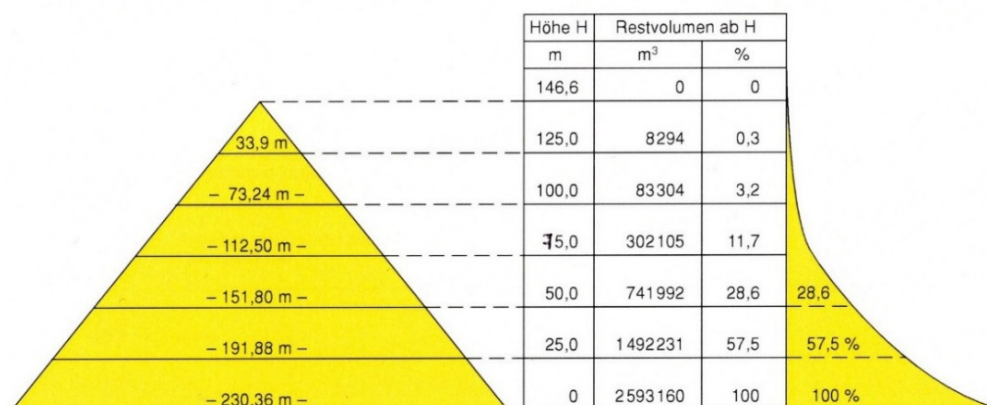


Fig.1

¹ Müller-Römer, F. Der Bau der Pyramiden im Alten Ägypten, Utz Verlag, München 2011, p.35ff.

² Lattermann, W., Der Bau der Cheops-Pyramide, Eigenverlag, München 2002, p.32.

Le transport de matériaux de construction le long d'une seule rampe (Fig.2) nécessite toujours plus de temps que le transport sur plusieurs rampes.

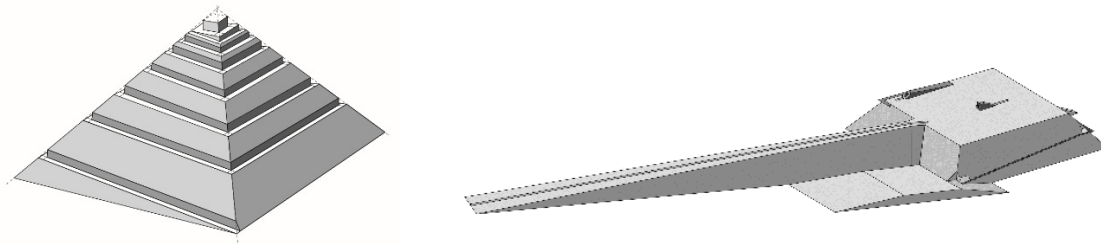


Fig.2

Pour des raisons géographiques, la majorité des pyramides ne peuvent être construites qu'avec des rampes parallèles aux flancs. La capacité de transport de multiples rampes disposées tangentiellement réduit considérablement le temps de construction (Fig.3).

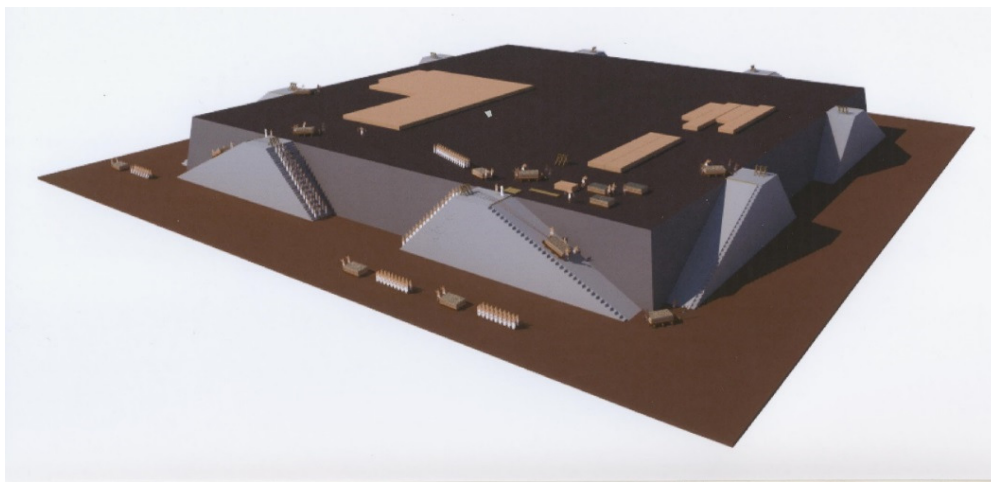


Fig.3

Cela conduit à la **conclusion 1** : un temps minimum de construction de la pyramide ne peut être atteint qu'en construisant sur les quatre côtés simultanément.

Le stockage de pierres à côté de la pyramide était hors de question sur de nombreux sites de construction en raison du manque d'espace. Les dispositifs de levage pour l'empilage ne sont pas documentés sur le plan archéologique dans l'Ancien Empire.

Cela nous amène à la **conclusion 2** : la production des pierres, le transport vers le chantier et la construction de la pyramide elle-même devaient être effectués de manière coordonnée ("just in time").

Les quantités de pierre requises quotidiennement pourraient être produites en parallèle dans différentes carrières. Cela a été prouvé sur les chantiers de construction de la Pyramide Rouge et de la Pyramide de Khéops. Le transport des carrières vers le site de construction pouvait également se faire simultanément par plusieurs rampes. C'est pourquoi le temps nécessaire au transport par les rampes disposées tangentiellement pendant la construction de la pyramide a été le facteur décisif pour la durée de construction de la pyramide.

Le déplacement horizontal et l'installation des pierres dans la couche supérieure de la troncature de la pyramide (Fig.3) pouvaient être effectués par un grand nombre de travailleurs en même temps. Les deux processus de travail ne dépendaient que de la quantité de pierres tirées sur les rampes et n'étaient donc pas décisifs pour la durée de la construction.

Le transport des pierres sur les longues rampes des carrières au chantier devait également être possible avec des pauses pour les animaux de trait ou les équipes de trait. Les pentes devaient donc être dimensionnées de manière à éviter tout glissement vers l'arrière. Le frottement statique $R = \mu \cdot Q \cdot \cos \alpha$ doit toujours être supérieur à la force $Q \cdot \sin \alpha$, qui tire la charge vers le bas de la vallée (Fig.4) :

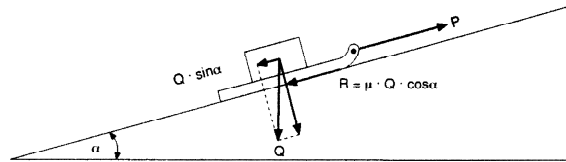


Fig.4

La **conclusion 3** précise donc que les rampes de transport entre les carrières et le chantier de construction ne doivent pas avoir une pente supérieure à $7 - 8^\circ$. Ces gradients sont prouvés archéologiquement.

Conclusion 4 : en revanche, les rampes tangentielles disposées sur les quatre côtés de la pyramide peuvent être construites beaucoup plus raides en raison des courtes distances de traction (Fig.3). Les pauses ne sont pas nécessaires.

3. Développement de méthodes de construction pour les pyramides de l'Ancien Empire

Les pyramides de Djéser et de Sekhemkhet au nord de Saqqara, celles de Khaba à Zaouiet el-Aryan et celles de Snéfrou au sud de Meïdoun et de Dahshour sont constituées de couches de pierre appuyées sur un noyau interne (Fig.5). Dans la littérature moderne, on les appelle des pyramides à couches.

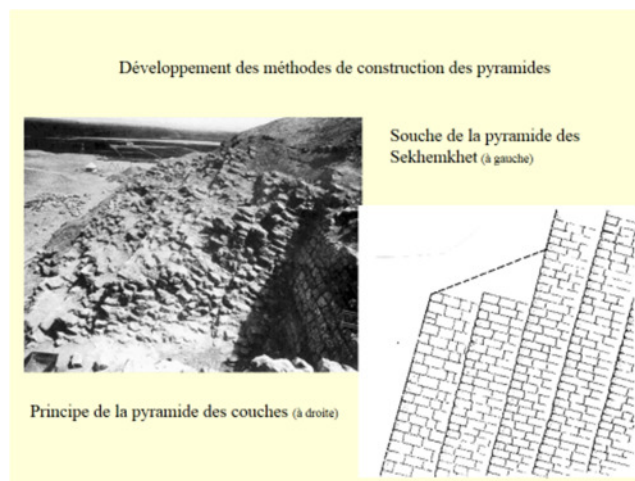


Fig.5

En Égypte, des tremblements de terre ont à plusieurs reprises endommagé les pyramides. Les pyramides de Snéfrou à Meïdoun et à Sud et Nord ont été partiellement très endommagées. La forte pression au sol des pyramides et le sol partiellement dangereux ont également contribué aux dégâts. Le poids des pyramides au m^2 est bien supérieur à celui des bâtiments modernes.

C'est pourquoi les maîtres constructeurs de Snéfrou ont décidé de poser les pierres horizontalement dans la partie supérieure de la pyramide rhomboïdale, lors de la construction de la pyramide de culte à côté de la pyramide rhomboïdale et lors de la construction de la pyramide rouge. En outre, pour la pyramide Rouge, l'évidement (« seked ») a été réduit à 28 doigts par coudée, soit un angle de 45° (Fig.6).

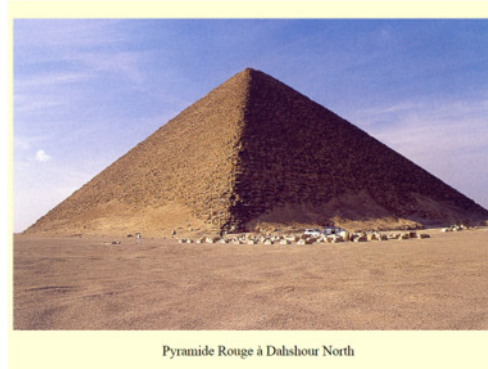


Fig.6

Pendant la construction de la pyramide de Khéops, un autre changement a été apporté : Le plateau calcaire nummulite très stable près de Giza a été choisi comme site de construction. La pyramide a été construite dans une structure à gradins. En même temps, la couche de revêtement extérieure a été appliquée. C'est le résultat d'enquêtes menées par différents égyptologues et l'auteur ainsi que de mesures prises en 2007 à la pyramide de Khéops avec l'accord du ministre égyptien des Antiquités.³



Fig.7

Cette structure de base en gradins est clairement visible à la pyramide de Mykérinos dans sa brèche de 8 m de profondeur sur le côté nord, que les Mamelouks ont frappée en cherchant l'entrée (Fig.8).



Fig.8

³ Müller-Römer, F. Der Bau der Pyramiden im Alten Ägypten, Utz Verlag, München 2011, p.174ff.; Vyse, H., Operations carried out on the Pyramids of Gizeh; Stadelmann, R., Die ägyptischen Pyramiden, Verlag von Zabern, 3rd. Edition 1997, p.109; Isler, M., Sticks, stones & Shadows, University of Oklahoma Press, 2001, p.201.

Maragioglio et Rinaldi ont fait un dessin en coupe de cette brèche. Les deuxième, troisième et quatrième étapes de la structure interne sont clairement visibles (Fig.9 à gauche).⁴

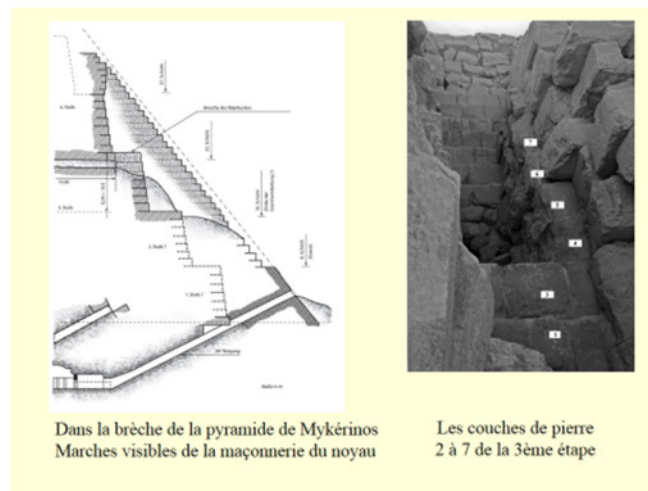


Fig.9

Les deuxième, troisième et quatrième étapes sont clairement visibles dans une coupe transversale du côté nord, dessinée par Maragioglio et Rinaldi (Fig.9 à gauche). L'intérieur de la pyramide est constitué de "boîtes de pierre" rectangulaires superposées, semblables au Mastaba, dont le plan au sol devient plus petit vers le haut. Les murs extérieurs, qui sont légèrement inclinés vers l'intérieur, sont faits de pierres taillées avec précision. Des pierres de différentes tailles sont utilisées à l'intérieur. Les espaces intermédiaires ont été remplis de sable et de Tafla (terreau) pour répartir la pression de manière uniforme. L'avantage de cette méthode de construction est également que les chocs de la terre peuvent être absorbés de manière beaucoup plus élastique qu'avec une maçonnerie faite de pierres taillées avec précision. En outre, la majorité des pierres ne doivent pas être finies. Cette méthode de construction permet de minimiser les coûts.

Les pyramides royales de Khéops et de Mykérinos montrent aussi clairement les structures de base des étapes (Fig.10).



Fig.10

La méthode de construction de la structure centrale en gradins et du revêtement extérieur des pyramides a été maintenue jusqu'à la fin de la 6e dynastie et est prouvée sur le plan archéologique (Fig.11, Pyramide de Néferirkarê à Abousir).

⁴ Maragioglio, V. et Rinaldi, C. A., L'Architettura delle Piramidi Menfite, Vol. VI, p.34ff. et anexe, TAV. 4, fig.2, cope S-N, édité de Müller-Römer.



Fig.11

La **conclusion 5** est donc la suivante : les pyramides de la 4^e à la 6^e dynastie ont été construites comme des pyramides à degrés avec un revêtement extérieur dès la construction de la pyramide de Khéops. Dans la littérature moderne, ce terme est de plus en plus utilisé.

Cette conclusion est suivie de la **conclusion 6** : La construction du revêtement extérieur des pyramides, la mise en place du pyramidion et le lissage du revêtement extérieur de haut en bas ne peuvent être réalisés qu'en utilisant des plates-formes ou des échafaudages montés à l'extérieur des pyramides pour des raisons constructives.

4. La technologie de mesure

La technologie de mesure a été particulièrement importante dans la construction des pyramides.

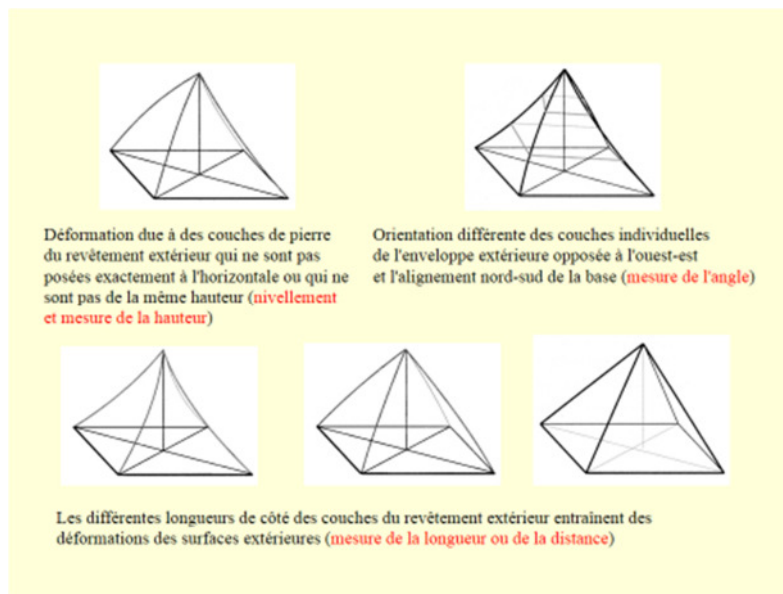


Fig.12

Les quatre bords des coins devaient toujours être guidés vers le haut en ligne droite et selon le même angle. Au sommet, ils ont dû se rencontrer à un moment donné. Entre eux, il fallait créer des surfaces planes. Cela a nécessité un nivellement et une mesure de la hauteur, de l'angle et de la longueur, chacun avec une grande précision.

La hauteur d'une marche de la maçonnerie centrale et des couches de revêtement construites simultanément pouvait être déterminée à l'aide d'une tige de mesure à partir de la longueur du bord de l'angle et de l'évidement (« *seked* », déplacement horizontal vers l'intérieur). Des corrections mineures étaient donc possibles. Une mesure diagonale entre les quatre coins était également possible. Ainsi, une comparaison constante était possible. Un fil à plomb central n'était pas nécessaire. Le guidage des angles d'une marche en ligne droite pouvait être vérifié au moyen d'une tige de mesure plus longue. Afin de pouvoir effectuer les mesures, la pose exacte des briques d'angle était nécessaire.

5. Les outils

La **7e conclusion** est la suivante : les hypothèses sur la construction des pyramides dans l'Ancien Empire ne peuvent inclure que des outils, des aides et des procédures d'extraction et de transport de matériaux qui sont prouvés sur le plan archéologique. Il s'agit notamment de burins en cuivre, de boules en pierre, de poutres en bois comme leviers, de traîneaux de transport, de plans inclinés ainsi que de rampes, de rouleaux, de cordes et de dispositifs de déviation (Fig.13).

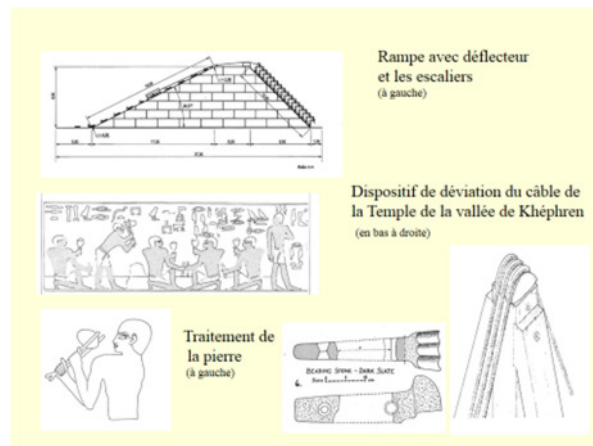


Fig.13

De courtes rampes raides avec un renforcement de 1 (hauteur) à 2 (base), ce qui correspond à un angle de $24,5^\circ$, sont documentées archéologiquement à plusieurs reprises dans l'Ancien Empire : Aux entrées des chambres funéraires des pyramides et dans les illustrations des tombes privées (Fig.14).

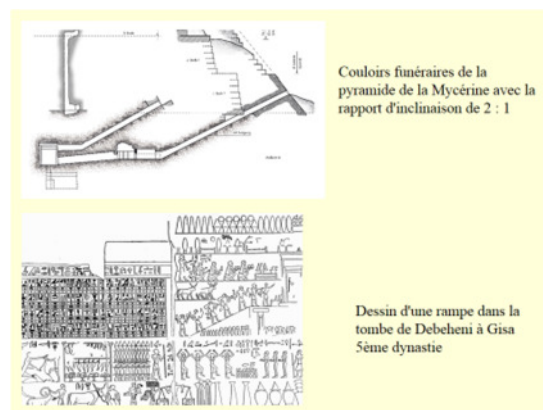


Fig.14

Les **sept conclusions** définissent les conditions essentielles pour la construction de pyramides dans l'Ancien Empire.

6. Evaluation des principales hypothèses de construction publiées jusqu'à présent

Les hypothèses de construction publiées jusqu'à présent par des égyptologues tels qu'Arnold, Lauer et Stadelmann sont basées sur des rampes menant verticalement à la pyramide. Ces derniers ont une capacité de transport plus faible par rapport aux rampes tangentielles. La construction des rampes nécessite en partie une quantité considérable de matériaux de construction et une grande surface. Ces propositions ne permettent pas d'obtenir le délai de construction le plus court possible. Aucune suggestion de solution pour la mise en place du pyramidion et le lissage des surfaces extérieures n'est faite (Fig.15).

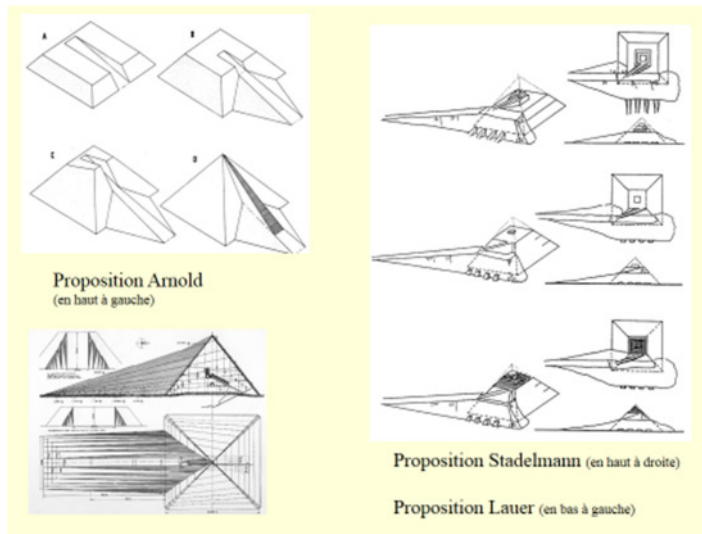


Fig.15

Il en va de même pour les hypothèses de construction proposées par Goyon, Lehner et Klemm, entre autres, avec une rampe disposée en spirale autour du moignon de la pyramide (Fig.16).

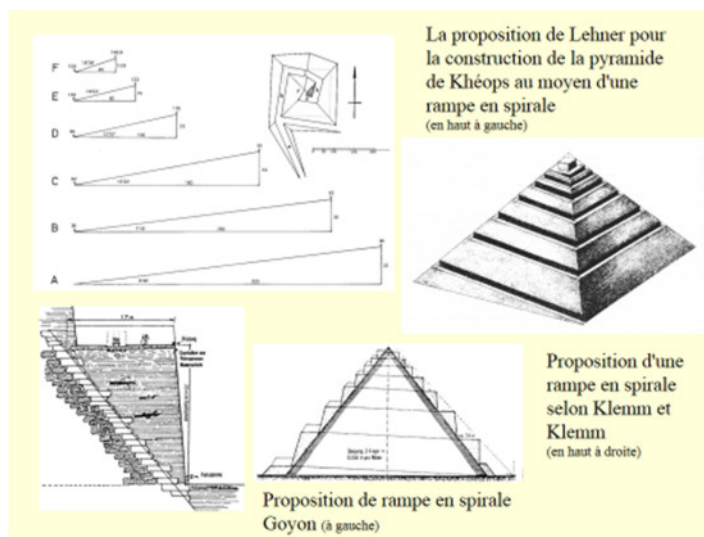


Fig.16

D'autres hypothèses de construction comme celles de Haan, Houdin, Isler et Kerres sont également exclues pour un certain nombre de raisons (Fig.17).

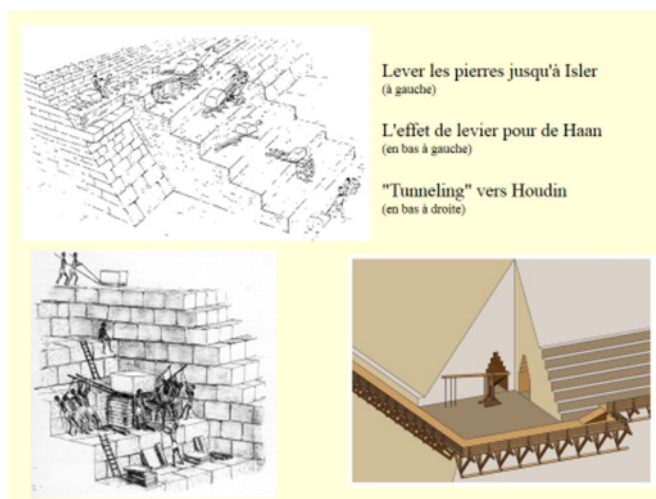


Fig.17

La plupart des hypothèses sur la construction des pyramides présentées jusqu'à présent ne fournissent pas non plus de solution concluante pour placer la pyramidion et lisser la surface extérieure de la pyramide de haut en bas. Les calculs de la durée de construction manquent également dans la plupart des suggestions.

En outre, les hypothèses de construction présentées par des non égyptologues négligent très souvent les preuves archéologiques des méthodes et outils de construction de l'Ancien Empire, telles que formulées dans la conclusion 7.

7. La théorie de l'auteur sur la construction des pyramides dans l'Ancien Empire

Les différentes phases de construction

Les différentes phases de construction de la proposition de construction des pyramides à degrés revêtues à l'aide de rampes raides fixées tangentiellement aux côtés et de conversions sont illustrées en principe à l'aide de l'exemple de la pyramide de Mykérinos (Fig.18) : en même temps que les degrés de la structure centrale (marron foncé) sont construits, la couche de revêtement extérieure (jaune) est érigée. Afin d'illustrer cette méthode de construction, la structure des étapes de base a été étendue vers le haut dans la figure 18. Les plates-formes pour la construction des rampes tangentielles et le transport des matériaux de construction sont fixées à la couche de revêtement extérieure non encore lissée (bossages) à la même hauteur que les marches du noyau (gris).

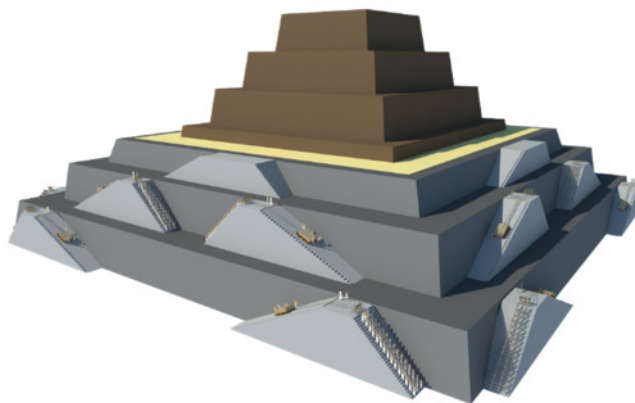


Fig.18

La Fig. 19 montre la pyramide terminée avec la reconstruction. Cela permet également d'enfermer le sommet de la pyramide et donc de monter le pyramidion sans problème (Fig.20).

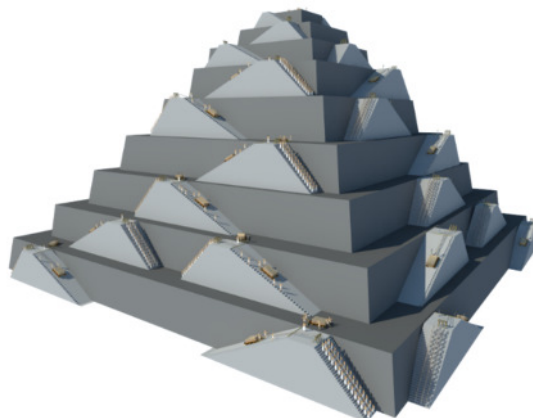


Fig.19

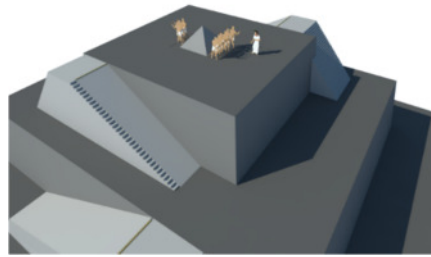


Fig.20

Après avoir posé le pyramidion sur le sol, la reconstruction est ensuite démontée de haut en bas tout en lissant simultanément la surface extérieure. Les travailleurs se tiennent sur les marches de la reconstruction et peuvent effectuer le travail sans danger (Fig.21).

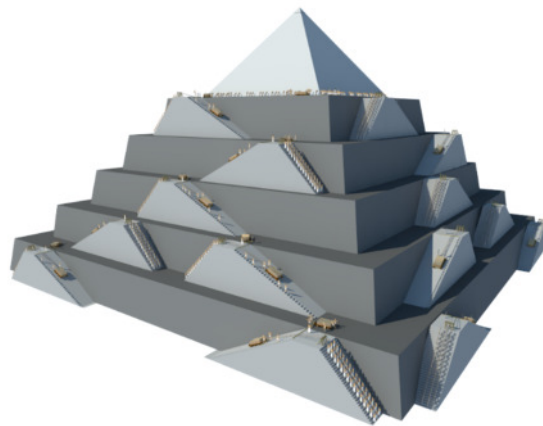


Fig.21

Calcul du temps de construction

Différentes hypothèses sont faites pour le calcul du temps de construction : La taille moyenne des pierres est supposée être de $1,2 \text{ m}^3$ et le poids par opération de remorquage de 3 t. Le temps de cycle pour une opération de remorquage d'une brique jusqu'à la plate-forme de la rampe (Fig.22) est supposé être de 15 minutes et une durée de travail quotidienne de 10 heures en fonctionnement par roulement, 300 jours par an.

Les dimensions supposées des rampes et la hauteur des marches sont indiquées à la Fig. 22. Avec un poids de traction vers le bas d'un travailleur de 75 kg, environ 20 travailleurs sont nécessaires.

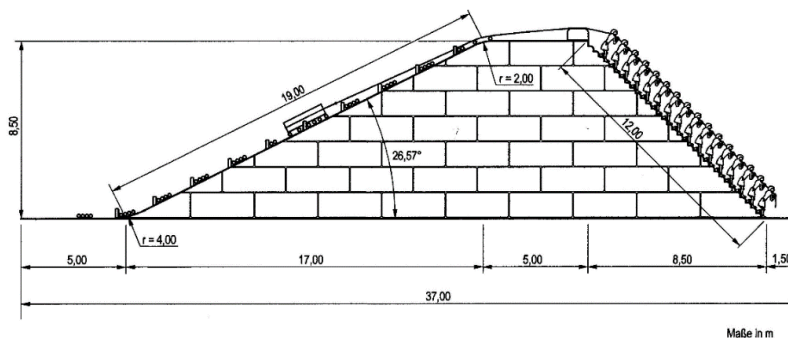


Fig.22

Au printemps 2012, l'auteur a montré lors d'une émission télévisée de la ZDF⁵ qu'une pierre d'environ 1,5 t pouvait être tirée vers le haut sur une rampe d'environ 10° par une équipe de traction composée de 12 à 14 personnes sans trop d'efforts (Fig.23).



Fig.23

Le temps de cycle de 15 minutes, qui avait été fixé auparavant sur la base de considérations avec les ingénieurs civils et des résultats de l'essai de traction de l'essai décrit ci-dessus, n'a malheureusement pas encore pu être vérifié sur un modèle (fig. 22). Cependant, la durée réelle de la construction de la pyramide est largement déterminée par cela. Une demande de financement d'un test pratique en 2014 a été soumise à la Fondation Allemande pour la recherche (DFG), mais malheureusement rejetée.

Le temps de construction de la maçonnerie du noyau, de la maçonnerie du revêtement et de son lissage, de la construction et du démontage des rampes et des plates-formes extérieures ainsi que des mesures préparatoires pour la construction de la pyramide du Mykérinos sera d'environ 4,8 ans selon la procédure décrite. Un calcul comparatif utilisant la même méthode de construction pour la Pyramide de Khéops et la Pyramide Rouge donne des temps de construction de 22,5 et 18,7 ans respectivement. La construction de la Pyramide Rouge est supposée commencer dans la 15^{ème} année du règne de Snefrou.

Les temps de construction calculés des trois pyramides ne contredisent donc pas les règnes des rois : Snefrou 35 ans, Khéops 23 ans et Mykérinos - plus récemment 6 ans (après Kauss et Warburton).⁶

Remarque finale

La proposition de l'auteur décrite ci-dessus pour la construction des pyramides dans l'Ancien Empire au moyen de rampes raides disposées tangentiellement et d'une reconstruction extérieure a été publiée pour la première fois en 2008. Dans une autre publication⁷ ainsi que dans diverses autres, une version complétée et développée de la théorie de la construction des pyramides dans l'Ancien Empire a été présentée.

Photos et dessins : Frank Müller-Römer

frank-mueller-roemer@t-online.de

⁵ Série pur+ "La plus grande tombe du monde", 16.6.2012, ZDF.

⁶ ⁶ Hornung, E., Krauss, R., Warnurton, D., A., Hrsg., Ancient Egyptian Chronology, HdO. section 1, Vol. 83, Brill, Leiden 2006, p.485.

⁷ Müller-Römer, F. Der Bau der Pyramiden im Alten Ägypten, Utz Verlag, München 2011.