

Conférences « hors les murs »

L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties (2680-2470 avant J.-C.)

par Jean-François MULLER

Avant-propos : Je suis parti de l'hypothèse selon laquelle Imhotep, grand architecte du roi pharaon Djéser et inventeur de la première pyramide, aurait été directement à l'origine de la construction des trois pyramides construites sous le règne de Snéfrou, premier pharaon de la IV^e dynastie. En effet, les trois successeurs de Djéser n'auraient régné que pendant des temps très courts. De ce fait, il y aurait eu une continuité d'effort et de recherche conceptuelle de la part d'Imhotep sur ses trente ou quarante dernières années de vie. Cela expliquerait en partie le formidable et rapide essor des pyramides avec un constant souci de perfectionnement. Réalité ou fiction ? L'avenir le dira peut-être. Au vu du recouvrement des dates, c'est plausible.

Introduction

Cette période de l'Histoire, qui s'étend sur près de deux siècles, est emblématique à plus d'un titre car elle nous a laissé nombre de témoignages de son extraordinaire degré d'avancement avec pourtant des moyens en apparence très sommaires. Approximativement vers -2670-60, débute la construction du complexe funéraire de Saqqarâ (ou Saqqarah) par le roi pharaon Djéser (ou Djoser)¹. Ce site exceptionnel au milieu des sables, Jean-Philippe Lauer y consacra une grande partie de sa longue vie d'archéologue car il comprit très vite qu'ici un **nouvel art de construire** en pierres taillées s'était développé à partir duquel commença l'âge des pyramides. Ainsi, entre la construction de la première pyramide à degrés au sein de ce fameux complexe (-2640 environ) et celle de la pyramide du pharaon Mykérinos (-2515 environ), 150 ans environ ont passé. Dans ce laps de temps, faible à l'échelle de l'histoire

1. Les deux orthographes alternent selon les publications. Djéser, d'après les derniers travaux de recherche, aurait régné de -2691 à -2625.

de l'humanité, les Égyptiens ont transporté entre 23 et 24 millions de tonnes² de pierres pour élever sept des plus belles pyramides dont celles de Khéops et Khéphren ! En admettant un rythme de travail annuel 300 jours à raison de 10 h/j, soit 450 000 heures réparties sur moins de 150 ans, cela implique une infrastructure et une organisation humaine capable en moyenne de débiter, déplacer et ajuster environ 50 ± 2 tonnes de blocs de pierre par heure ! Même si l'on admet qu'à l'intérieur de chaque pyramide tous les blocs de pierre ne sont pas ajustés au millimètre, c'est tout simplement sidérant.

C'est bien là que réside le mystère des pyramides !

En effet, il n'y avait en ce temps-là, aucun moyen de transport à roues ni système de levage efficace pour de très lourdes charges. Archéologiquement parlant, il n'y en a pas de trace probante. Et pourtant, en termes d'évolution des civilisations, une telle rupture dans l'art de la construction n'est pas le fruit du hasard. Cela peut à juste titre s'apparenter à l'avènement simultané de plusieurs « sauts technologiques » arrivés à maturité selon la terminologie d'aujourd'hui. Cet article a pour objet de mettre en lumière certains d'entre eux.

De nombreuses preuves indiquent que la civilisation égyptienne a évolué rapidement du nomadisme vers une société sédentarisée relativement évoluée dès le septième millénaire avant J.-C. avec comme lien et artère de communication, le Nil. Cette évolution remarquable est due à la conjonction de nombreux éléments géographiques favorables : en premier lieu, les crues régulières du Nil dès la fin juillet avec le dépôt de limons noirs très fertiles tout au long de son cours créant une sorte d'oasis sur plus de 2500 km au milieu des déserts, en second lieu, un soleil généreux tout au long de l'année, et enfin de nombreuses ressources minérales (pierres précieuses, or, cuivre, minerais

2. Hauteur (h), longueur de la base (L), volume ($L^2 \times h/3$) et poids des pyramides en prenant une densité moyenne de la pierre entre 2,6 et 2,7 ; le poids total avec une densité moyenne de 2,65 est de **23 millions de tonnes** [la pyramide à degrés sans doute inachevée de Sékhem-Khet (III dynastie), ni celle inachevée de Didoufri (IV dynastie) successeur de Khéops, ne sont comptées] :

	h	L	V	poids
Pyramide de Djéser	60 m	123 m/107 m	0,26 million de m ³	0,69 million de tonnes (base parallélépipédique)
Pyramide de Meidoum	70 m	144 m	0,43 million de m ³	1,14 million de tonnes (base carrée)
Pyramide de Dahshur sud	105 m	188 m	1,3 million de m ³	3,45 millions de tonnes (base carrée)
Pyramide de Dahshur nord	105 m	220 m	1,67 million de m ³	4,42 millions de tonnes (base carrée)
Pyramide de Khéops	146,6 m	230,33 m	2,6 millions de m ³	6,9 millions de tonnes (base carrée)
Pyramide de Khéphren	143,5 m	215 m	2,2 millions de m ³	5,83 millions de tonnes (base carrée)
Pyramide de Mykérinos	65 m	104,6/102,2 m	0,23 million de m ³	0,62 million de tonnes (base parallélépipédique)

*L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)*

variés, natron, beau calcaire blanc, gypse, diorite, quartzite, granit, albâtre... etc.). De plus, les déserts n'étaient pas aussi arides qu'aujourd'hui comme en témoignent les magnifiques scènes de chasse peintes sur les murs des tombeaux³. Par conséquent, le bois sans être très abondant, était suffisant pour développer de nombreux ateliers de poteries avec la recherche constante de les rendre de plus en plus résistantes et belles par la transcription de signes animaliers ou de symboles liés aux rites de survie. Bref, Nil et soleil furent le creuset d'une civilisation incomparable, « pionnière en raison des connaissances, de la sagesse et de l'humanisme qu'elle nous a transmis », comme le souligne Christiane Desroches Noblecourt dans l'avant propos de son livre⁴.

Les verrous « technologiques » de l'Égypte antique se situent tout d'abord autour de l'art du potier, du forgeron d'alliage de cuivre, des transports de matériaux notamment par bateau, des artisans du bois et enfin du géomètre/ architecte. Bref, la saga des pyramides était sans doute inscrite dans l'air du temps. Mais il fallut une autre conjonction. C'est celle de l'association d'un roi-pharaon puissant et autoritaire (Djéser) avec Imhotep, architecte génial et organisateur hors pair (**Figure 1**). À eux deux, ils ont révolutionné l'art de construire et d'utiliser au mieux les ressources connues tout en mobilisant les hommes et compétences disponibles. Cette aventure humaine est extraordinaire puisqu'aujourd'hui nous cherchons encore à comprendre comment ils ont pu lancer, tester et valider un procédé de construction des pyramides qui leur a survécu, non seulement pendant les 150 ans qui suivirent au cours desquels plusieurs tâtonnements et améliorations ont conduit aux deux pyramides majeures que sont Khéops et Khéphren, mais bien au-delà, si l'on prend en compte toutes les pyramides répertoriées.

Les chambres bleues souterraines de la première pyramide du pharaon Djéser

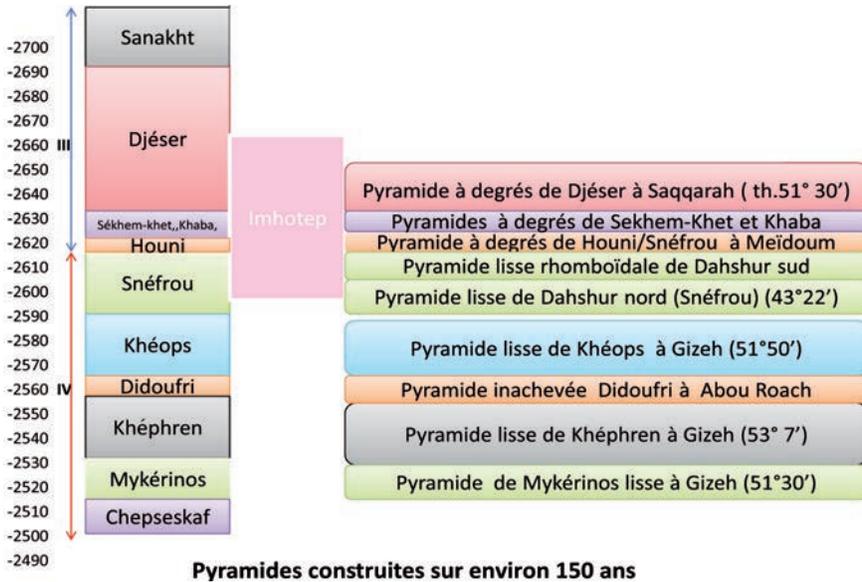
Sous la pyramide à degrés du pharaon Djéser⁵ (en réalité, en dessous du mastaba⁶ initial), un grand puits vertical de 28 mètres de profondeur d'une section énorme de 49 m² (7 m × 7 m) avait été creusé directement dans la roche afin de pouvoir construire au fond tout un dédale de couloirs et de chambres secrètes autour du caveau entouré de dalles de granit d'Assouan et recouvert par d'énormes poutres également en granit de la même provenance.

3. GROS DE BELER (Aude), *Vivre en Égypte au temps des pharaons*, Éd. Errance, 2001.

4. DESROCHES NOBLECOURT (Christiane), *Le Fabuleux Héritage de l'Égypte*, Éd. SW. Télémaque, 2004.

5. LAUER (Jean-Philippe), *Le mystère des Pyramides*, Presses de la cité, 1988.

6. Le mastaba initial construit en pierre avait un plan carré de 63 m de côté avec une hauteur de 8 m revêtu de belles pierres blanches l'ensemble recouvrant complètement le comblement du puits provisoire.



Pyramides construites sur environ 150 ans

Figure 1. Les périodes de règne des pharaons des III^e et IV^e dynasties selon les dates reportées dans le livre de J-P Adam et C. Ziegler (cf. réf. 7), la durée de vie d’Imhotep (50-60 ans) et les dates approximatives des pyramides de ces deux dynasties. (« th », signifie ongle théorique)

Une des dalles comportait un orifice circulaire clos par un énorme bouchon tronconique qui constituait la seule ouverture de ce caveau dont la voie d’accès était une galerie inclinée en escalier débouchant juste au-dessus de cet orifice dans une anti-chambre surplombante. Ce gigantesque puits, dont la seule fonction était l’accès pour éliminer les déblais et acheminer les dalles du caveau souterrain, a été ensuite soigneusement comblé et recouvert par le mastaba initial puis par la pyramide à degrés susmentionnée.

Autour du caveau⁷ s’étendait à 32 m de profondeur un lacs de galeries et de salles où se situaient les tombes des reines et des enfants royaux comportant plusieurs sarcophages d’albâtre. Parmi ces salles, les plus belles sont les « chambres bleues » qui constituent un magnifique témoignage de l’art de la céramique en ce début de la III^e dynastie. Leurs parois sont recouvertes par des milliers de plaquettes de faïence bleu-vert (céramique) inaltérable comportant dans la partie supérieure des motifs de fines nattes de roseaux ayant l’aspect des hiéroglyphes « djed » dont l’image de pilier stylisé symbolise la « stabilité » ou « l’endurance ».

7. ADAM (Jean-Pierre), ZIEGLER (Christiane), *Les Pyramides d’Égypte*, Hachette Littérature, 1999.

*L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)*

Cette céramique de couleur bleu-vert est constituée en réalité par ce que l'on appelle aujourd'hui le « bleu égyptien » qui s'est avéré être un silicate artificiel mixte de calcium et de cuivre [CaCu(Si₄O₁₀)] obtenu par cuisson à haute température d'un mélange de carbonate de calcium (1 part), de malachite (de couleur verte 1/2 part) et de silice (4 parts). Selon la température de cuisson, sa couleur varie du bleu profond (950 °C) au vert pâle (1 050/1 100 °C). Il a été démontré grâce aux instruments scientifiques les plus modernes (diffraction des rayons X, microscope électronique à balayage avec fluorescence X) que les plus beaux bleus sont obtenus quand la malachite est remplacée par l'azurite (de couleur bleue 1/3 part) et quand les microcristaux présentent une structure cristallographique mesurable par diffraction X (*cf. encadré page suivante*). Pour obtenir un tel résultat, il fallait être en mesure de peser avec une bonne précision les minéraux purs constitutifs de façon à respecter les proportions nécessaires pour obtenir ce silicate inaltérable⁸. Dans le cas des plaquettes de faïence des chambres bleues, il est vraisemblable qu'une faible part de la malachite constitutive était en excès (minerai de couleur verte) et par conséquent restait en impureté après la cuisson de la céramique lui donnant ainsi une couleur bleu-vert. Une telle science des matériaux il y a 5 000 ans est déjà en soi remarquable.

Ainsi nous pouvons déduire, à partir du formidable travail archéologique qui a été réalisé par J-P. Lauer et al. sur le site de Saqqarah, qu'au début de la III^e dynastie les Égyptiens possédaient bien des outils et des moyens qui les rendaient capables : 1) de creuser un puits vertical de très grande dimension (environ 1 300 m³) ; 2) d'y acheminer depuis Assouan, puis de descendre par ce puits vertical des dalles et poutres en granit monolithique de grande dimension ; 3) de recouvrir des murs entiers en céramique bleu-verte sur des parements en calcaire blanc délicatement sculpté ; 4) de tailler et polir des sarcophages en albâtre et de pouvoir les descendre ; 5) de fabriquer et stocker des milliers de vases polis⁹ dans des matériaux les plus variés tels que l'albâtre, le schiste, l'améthyste ou le gneiss ; 6) de construire en plus un mur d'enceinte de 10 mètres de haut en pierre taillée formant un quadrilatère de 544 m sur 277 m ; 7) puis, constatant que le mastaba n'était plus visible, d'élever une première pyramide à degré, laquelle n'étant pas jugée suffisamment majestueuse, fut agrandie en une deuxième à six degrés culminant à 60 m de haut, celle que nous pouvons encore admirer aujourd'hui ! Et tout cela en moins de trente ans, peut-être quarante !

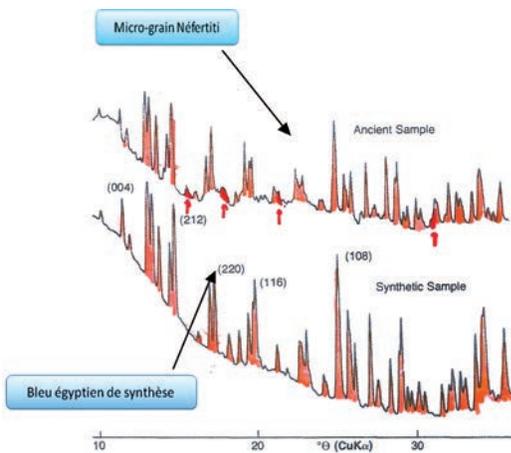
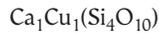
8. Cf. l'encadré consacré à la synthèse du bleu égyptien.

9. Ces vases ont été retrouvés par milliers dans certaines salles du complexe souterrain évoqué ci-dessus. Ils constituent un vrai trésor et témoignent de la maîtrise extraordinaire des artisans de cette période précédant la III^e dynastie. En effet, certains d'entre eux comportaient des inscriptions de l'époque « thinite » (*cf. la référence 5*).

Le bleu ou le vert égyptien est obtenu en mélangeant **une** part de carbonate de calcium $[\text{CaCO}_3]$ appelé calcite, **une demi**-part de malachite verte $[\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2]$ ou **un tiers** de part d'azurite bleue $[\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2]$ et enfin **quatre** parts de sable de silice. Dans les deux cas, il y a **quatre** atomes de silicium pour **un** de calcium et **un** de cuivre. Un peu de borax est ajouté. C'est un fondant qui permet d'abaisser la température de fusion du mélange et qui se trouve en général à proximité de salines.

La pièce (pot ou tablette ou figurine) est badigeonnée par le mélange en suspension avec un liant organique (comme par exemple de la cire visqueuse) qui disparaîtra au moment de la cuisson. Avec un foyer alimenté en bois d'acacia (très présent dans la vallée du Nil et dans son delta) doté d'un soufflage assisté, une température de 950° peut être atteinte. Au bout d'une heure le chauffage est arrêté. Lorsque la température revient à la température ambiante, les pièces de céramique bleue peuvent être retirées du four.

En chauffant le mélange ci-dessus seul dans les mêmes conditions, on obtient une poudre bleue qui est à nouveau broyée finement. S'il y a un excès de malachite, la poudre bleue doit être lavée par de l'acide chlorhydrique à 20 %. Comme cet acide n'existait pas dans l'antiquité, les potiers égyptiens avaient dû trouver progressivement la bonne recette pour qu'il n'y ait pas d'excès de l'un ou l'autre des quatre constituants. La poudre bleue obtenue, analysée par fluorescence X, par absorption atomique, torche à plasma et par diffraction X, s'est révélée être un silicate mixte de calcium et de cuivre dont la formule est écrite ci-dessous :



Spectres de diffraction X du bleu égyptien de synthèse avec celui du chapeau de Néfertiti. Les petites flèches rouges indiquent les rais de diffraction X correspondant à l'azurite de départ.

Il y a donc bien dans ce silicate, **1** atome de calcium et **1** atome de cuivre pour **4** atomes de silicium. Les proportions du mélange décrites ci-dessus sont donc conformes à cette stœchiométrie. Pour illustrer ceci, il a été prouvé par diffraction des rayons X que les microcristaux bleus du chapeau de Néfertiti conservé au musée de Berlin avaient bien la structure de ce silicate artificiel.

*L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)*

Il fallait donc des artisans égyptiens formés et encadrés (ingénieurs/techniciens des temps modernes) ayant des outils robustes et des procédés déjà parfaitement éprouvés.

Les forgerons de l'antiquité égyptienne

Nous venons de voir, par l'exemple du bleu égyptien, que la température du foyer d'un potier pouvait atteindre 950 °C-1 000 °C voire un peu plus, ce qui implique qu'il y ait un soufflage d'air au sein du foyer. Or, au musée du Caire, une stèle gravée en relief, dotée d'une légende en hiéroglyphes, montre clairement un foyer de potier avec quatre souffleurs munis d'un long tube comme les souffleurs de verre d'aujourd'hui mais terminé par une protubérance ovoïdale permettant sans doute stocker de l'air afin de maintenir le soufflage pendant la phase d'inspiration¹⁰. Il est donc raisonnable de penser que les égyptiens connaissaient la métallurgie du cuivre et celle du bronze car dans ces conditions, un four de potier peut monter à des températures supérieures à 1 000 °C (le cuivre fond à 1 084 °C) à condition bien sûr que la taille du foyer soit réduite, ce qui devait être le cas pour les applications métallurgiques de cette époque.

Or les minerais de cuivre sont très abondants tant dans la basse Égypte notamment dans les djebels proches de la ville actuelle de Za'farâna au bord du golfe de Suez, que dans le Sinaï ou la Nubie. Ils se présentent principalement sous forme de carbonate de cuivre hydroxylé [azurite bleue : $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ou malachite verte : $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$] déjà utilisé pour le bleu égyptien. Les sulfures de cuivre tels que la covellite (CuS), la chalcocite (Cu_2S) ou encore l'énargite ($\text{Cu}_3\text{S}_4\text{As}$) sont également présents en Égypte, mais il n'y a pas de preuve qu'ils aient été exploités dans l'antiquité. Par contre, en ce qui concerne la malachite et l'azurite des galeries très anciennes ont été trouvées notamment en basse Égypte comme le souligne Laurence Garenne-Marot dans son article consacré à l'étude métallographique de seize objets en métal cuivreux conservés au musée de l'Université de Philadelphie¹¹. Ces mines anciennes se situent de part et d'autre du bras de la Mer rouge menant au canal de Suez (**Figure 2**).

La malachite ou l'azurite dont les couleurs sont très nettes pouvait être obtenues relativement pures par simple burinage (ou grattage) des pierres où elles sont mêlées. De plus, les Égyptiens avaient constaté la présence de cuivre natif dans les mines de ces deux carbonates. Ils avaient dû également constater qu'en les chauffant fortement dans leurs fours de potier et sans autre minéraux additionnés, ils obtenaient une masse métallique (cf. **encadré sur la**

10. Une photographie de cette stèle a été reproduite dans le n° 4020 de novembre 2001 de la revue National Geographic (version française).

11. GARENNE-MAROT (L.), *Le cuivre en Égypte pharaonique : sources et métallurgie*, Paléorient., 1984, vol 10 (n°1), p. 97-126.

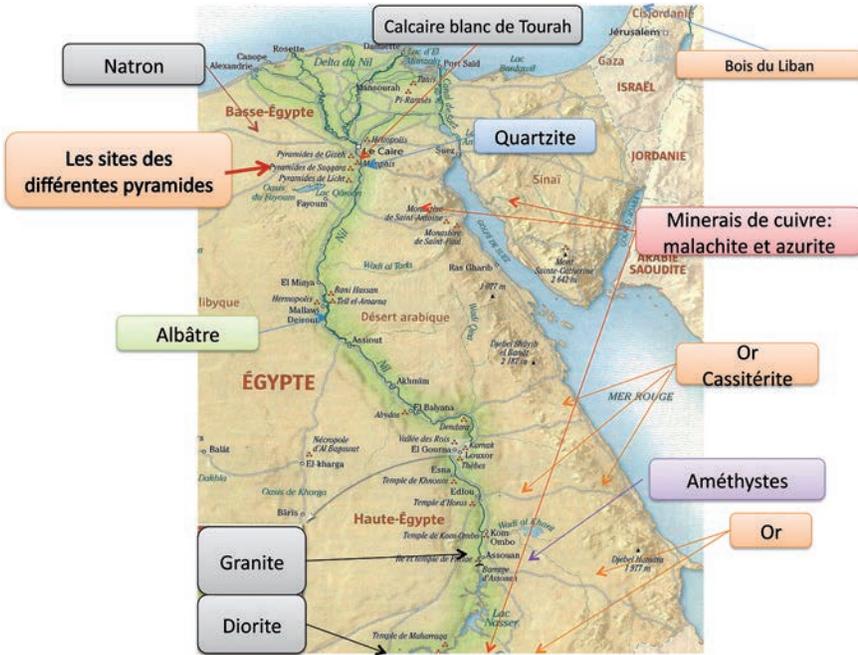


Figure 2. Carte d'Égypte avec quelques sites archéologiques et les principaux sites d'exploitation des roches et des minerais. Données tirées de l'Atlas historique de l'Égypte ancienne.

métallurgie du cuivre) qu'ils pouvaient, comme le cuivre natif, marteler à chaud sur des socles en diabase¹² avec des maillets dont l'extrémité était également en diabase solidement fixée au manche par des lanières de cuir. Ainsi, il apparaît à la lecture de l'article en réf.¹³ que les Égyptiens de la période prédynastique étaient capables d'élaborer des outils en cuivre durci par succession de recuits et de martelages à froid notamment dans leurs parties tranchantes. À cet effet, l'auteur cite le travail d'un autre métallurgiste¹⁴ qui a analysé une hache de la période prédynastique par des mesures métallographiques et de dureté « Brinell » qui montrent clairement que le tranchant avait été plus « travaillé » que le reste de l'outil. De plus, les analyses ont permis de

12. Les diabases (et les dolérites) sont des roches basaltiques très dures, grenues et de coloration verte ou noire. Le Soudan, qui correspond à l'ancienne Nubie contrôlée par les pharaons, en est pourvu.

13. *Atlas géographique de l'Égypte ancienne*, Bill MANLEY, Éd. Autrement, Collection Atlas/Mémoires (1998).

14. CARPENTER (H.C.H.), *An Egyptian axe-head of great antiquity*, Nature, 130, 625, 1932.

La métallurgie du cuivre de l'Égypte antique

L'histoire de la métallurgie est intimement liée à l'élévation de la température des foyers. Avec le bois, celle-ci a pu être augmentée progressivement d'abord par soufflage manuel puis mécanique. Ensuite, il y eut en Angleterre l'utilisation de la houille, puis celle du coke (charbon dégazé très dur) toujours combinée au soufflage mécanique (soufflet actionné par des roues à aubes). Au XVII^e siècle, avec des fourneaux de plus en plus hauts améliorant le tirage et combinés au soufflage mécanique, la température atteinte a permis l'obtention directe de la fonte liquide. L'ère industrielle commença au XIX^e siècle avec l'affinage de la fonte à haute température en milieu oxydant, la transformant en acier par élimination de l'excès du carbone dissous responsable de sa fragilité à l'état solide.

Aujourd'hui il est démontré en thermodynamique appliquée à la métallurgie (diagramme d'Ellingham) que les oxydes de cuivre sont stables à pression atmosphérique jusqu'à des températures supérieures à 1400 °C. Toutefois, ils peuvent être réduits par **le carbone** à partir de 300 °C. Ce n'est pas le cas par exemple pour l'oxyde de fer Fe₂O₃ qui ne peut être réduit par le carbone et surtout par le monoxyde de carbone qu'au-delà de 950 °C. Plus la température s'élève, plus la réduction est favorisée thermodynamiquement.

Pour la métallurgie du cuivre, à l'époque de l'Égypte antique, mis à part le cuivre natif relativement rare, la malachite verte [Cu₂(CO₃)(OH)₂] et l'azurite bleue [Cu₃(CO₃)₂(OH)₂] sont les mêmes ingrédients que ceux utilisés pour élaborer le bleu égyptien. Chauffés à 800 °C, seuls ou en mélange, ces deux hydroxy-carbonates de cuivre se décomposent pour donner un mélange d'oxydes de cuivre Cu₂O/CuO et du dioxyde de carbone CO₂. À cette température au contact du carbone porté au rouge issu de la combustion du bois d'acacia, les oxydes de cuivre sont réduits **par le carbone** en cuivre métallique avec émission de CO₂ et d'un peu de monoxyde de carbone CO. Le cuivre impur, compte tenu de sa densité (8,8 g/cm³), s'agglomère en bas du foyer en une masse noirâtre qu'il faut reprendre par une succession de recuits (ramollissement) au cœur du foyer et de martelages afin de le purifier progressivement. C'est un travail de forgeron classique, simplement le fer est ici remplacé par le cuivre.

montrer que dans la plupart de ces outils, le cuivre comportait une forte teneur en arsenic¹⁵. Toujours dans ce même article, il est précisé que la généralisation de la métallurgie des bronzes avec fusion à plus basse température (800 °C) n'est apparue que plus tardivement (Moyen Empire) en mélangeant la malachite avec de l'oxyde d'étain (cassitérite) dont l'Égypte est également

15. Il est démontré que la présence de 2 à 3 % d'arsenic (ou de bismuth) renforce la dureté de l'alliage de cuivre.

pourvue notamment dans les mines d'or situées au sud-ouest de la ville de Quseir sur les bords de la Mer Rouge au niveau du 26^e parallèle (**Figure 2**).

Par conséquent, au début du règne de Djéser, les forgerons avaient depuis longtemps la maîtrise du forgeage d'outils en cuivre à forte teneur d'arsenic voire de bismuth. En testant empiriquement les différentes origines de malachites ou d'azurites, ils avaient dû trouver des gisements suffisamment abondants (riches en arsenic – mais sans le savoir expressément) qui leur permettait de renforcer au maximum cette dureté à la pointe ou au niveau du tranchant sans pour autant oublier le travail indispensable de martelage. Dans l'optique d'un travail à grande échelle, il est également vraisemblable qu'Imhotep avait dû mobiliser de très nombreux forgerons et potiers afin de rationaliser la structure des fours, les méthodes de travail et l'acheminement du bois nécessaire et des minerais avec pour ceux-ci leur purification et leur stockage. De même, il a dû prévoir la fabrication en grande quantité de cannes de soufflage selon le modèle décrit plus haut.

Par ailleurs, sachant que la cuisson d'une poterie est aujourd'hui considérée comme une opération de frittage, il n'est pas totalement impossible que les égyptiens de cette époque aient eu l'idée de renforcer la dureté de leurs outils en incorporant par martelage à chaud après recuits **des poudres très fines** de silice ou de béryl (également en relative abondance en haute Égypte). Cette hypothèse mériterait d'être vérifiée en analysant les rares ciseaux ou burins qui subsistent encore, tel ce coin en alliage de cuivre exposé au musée du Caire (**Figure 5c**). Le fait que des vases aient été creusés par abrasion indique clairement que les Égyptiens savaient parfaitement maîtriser la dureté différentielle des matériaux naturels à leur disposition.

Sans des outils de grande dureté, ni l'exploitation des carrières de pierre, ni le creusement de tranchées ou de puits verticaux, ni l'arasement des sols rocheux, ni l'élaboration à grande échelle de blocs pierre finement taillés n'auraient été possibles. C'est bien la clé de la réussite de ces gigantesques travaux.

Les autres outils et les moyens de transports des matériaux

Par contre, les autres outils indispensables d'un bâtisseur sont parfaitement connus : le fil à plomb (merkhet), l'appareil de visée (bay), le forêt à mèche de silex ainsi que le système de pince de levage ont été parfaitement décrits dans le livre de J-P Lauer (*cf. réf. 5*). De même en examinant les carrières de granit rose d'Assouan, il est clairement établi, parce qu'il en subsiste des vestiges, que les monolithes qui en ont été extraits, avaient été découpés par usure à l'aide de cordes dans les torons desquels des éclats de silex étaient été insérés à l'instar des fils micro diamantés d'aujourd'hui. Si cette technique était efficace pour le granit, elle l'était à fortiori pour les carrières de roches calcaires, soit du plateau rocheux qui longe le Nil de Meïdoum à Gizeh (ou Giza), plateau où la plupart des pyramides ont été élevées, soit du site de

*L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)*

Tourah (Tura) dont le calcaire blanc et très fin avait été choisi comme parement notamment pour les pyramides de Khéops et de Khéphren. En plus du sciage sur de longues distances, des scies à lame de cuivre (là aussi des analyses de surface seraient judicieuses) ont été retrouvées pour découper les blocs de calcaire dont certains en ont gardé les strates. Il est vraisemblable que les carriers les notaient avec soin afin de permettre aux équipes chargées de les agencer sur la pyramide, de les replacer les uns à côté des autres¹⁶ obtenant ainsi des joints d'une finesse incomparable.

Sur terre, la roue n'existant pas encore, le transport se faisait à l'aide de traîneaux à patins pouvant supporter des blocs de plusieurs tonnes et tirés soit par des bœufs soit par une équipe d'une vingtaine de tireurs, voire plus dans le cas des très lourds monolithes. Un de ces traîneaux subsiste encore. Il a été trouvé sur le site de Dahshur par l'archéologue Jacques de Morgan en 1894. L'usage en est très répandu dès la première dynastie tant est si bien qu'il a donné naissance à un hiéroglyphe symbolisant le transport¹⁷. En cas de forte pente, l'usage consistait à répandre sur le sol de la chaussée du limon noir du Nil et, juste devant chacun des deux patins du traîneau, il suffisait de verser de l'eau pour rendre le limon très glissant, diminuant ainsi notablement les forces de frottement. Le traîneau avançait comme guidé par deux rails parfaitement lisses. L'économie d'eau était substantielle et, de plus, efficace ! Cette technique a été vérifiée par des archéologues américains.

Pour les longues distances, le transport des lourdes charges se faisait naturellement par bateau. C'est aussi une des raisons pour lesquelles toutes les pyramides sont proches du Nil. De ses berges, un cheminement permettait d'accéder au chantier. Puis, de l'avis de nombreux archéologues, avec en premier lieu Jean-Philippe Lauer (*cf. réf. 4*), l'accès à la plateforme de la pyramide en cours d'élévation ne pouvait se faire que par une rampe d'accès suffisamment large et longue afin que les tireurs montants puissent acheminer leurs lourdes charges avec une pente raisonnable n'excédant pas 6° d'angle (ce qui correspond à une pente d'environ 10 % ce qui est déjà considérable) sans pour autant être gênés par les équipes descendantes. De plus, le va-et-vient avec d'autres équipes des différents corps de métiers, dont les porteurs d'eau, devait être permanent. Les équipes descendantes devaient en profiter pour évacuer certains des déchets pierreux inutilisés afin de surélever la rampe au fur et à mesure de l'avancement du chantier.

Le problème, c'est qu'aucun vestige de ses rampes, mise à part celle de la pyramide de Licht (ou Licsht) au nord de Meïdoum, n'ont été retrouvées.

16. HAMONOU (Éric), *Comment édifier une merveille*, Les cahiers de Sciences et Vie, n° 106, août-septembre 2008.

17. WILSON (Hilary), *Lire et Comprendre les hiéroglyphes – La méthode*, p. 260, Éditions Sand, 1996.

D'où l'hypothèse largement médiatisée que des rampes hélicoïdales auraient été directement intégrées à la construction de chaque pyramide¹⁸. À cela, j'ai **deux objections majeures** : en premier lieu, les virages à 90° impliquaient de nécessaires précautions, donc des ralentissements, pour qu'il n'y ait pas de rupture dans l'effort de traction sur un espace aussi restreint. En deuxième lieu, et surtout, cela obligeait les tireurs de tracter de lourdes charges dans un espace fermé chargé de l'humidité de leurs transpiration en pleine chaleur. Les conditions auraient été quasi inhumaines. En effet, les orifices ménagés à chaque coin n'auraient certainement pas été suffisants pour rendre l'atmosphère de ces tunnels hélicoïdaux supportable. Par ailleurs, les mesures de densité différentielles entreprises notamment sous l'égide d'EDF par micro gravimétrie n'ont toujours pas apporté une preuve irréfutable de leurs existences.

En fin de compte, l'argument de **l'absence des vestiges des longues rampes linéaires** pour nier leur existence ne tient pas. En effet, si les concepteurs ont mis en place une infrastructure si considérable pour construire autant de pyramides dans un laps de temps relativement court, ils ont dû logiquement établir le même type d'organisation pour la déconstruction de ces rampes afin que la forme parfaite recherchée se détache dans l'espace et marque ainsi les esprits... pour longtemps ! Les multiples équipes mobilisées pour la construction ont dû, par roulement et simple portage de paniers chargés des cailloux, disperser rapidement avec beaucoup moins d'effort les matériaux résiduels dans les déserts environnants. Une méthode à la chinoise avant l'heure !

Reste, si je puis dire, la **Pierre d'achoppement** : comment à l'aide de simples leviers et de cales de bois, les Égyptiens ont-ils pu déplacer, ajuster au millimètre des millions de blocs de 0,2 à 2,5 tonnes à plus de 100 mètres de hauteur sur des pentes de 51°. Certes, c'est très beau vu de loin, mais diablement pentu et par conséquent dangereux quand on y travaille. Force est de constater que les peintures murales, pourtant fort nombreuses, sont muettes sur ce sujet.

La clé de cette énigme devrait peut-être un jour ressortir des vestiges du site de Saqqarah. Revenons sur le fameux puits vertical de section carrée profond de 28 m afin de pouvoir construire un caveau en granit (vide infra). Ces blocs et ces dalles acheminées à grands frais depuis Assouan, il fallait bien les descendre directement avec un maximum de sécurité. C'est la raison de la très grande section (7 m × 7 m) choisie pour ce puits provisoire. Aucune corde soutenant de telles charges ne pourrait résister à des frottements sur un chevalet rigide sans qu'il ait un axe de rotation pouvant les minimiser. Pour réaliser cette descente sur 28 m de profondeur, il fallait nécessairement inventer l'équivalent d'une grue qui puisse assurer la descente de ces fortes

18. HOUDIN (Jean-Pierre), Sciences et Avenir, avril 2007.

*L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)*

charges sans que cela s'emballe. Dans ce cas précis, compte tenu du formidable travail souterrain qui a été réalisé, il fallait qu'un tel système existât sur une longue période. Il devait sans doute être conçu sur le principe de la « chèvre » antique¹⁹ avec peut-être un système de contrepoids. Pour l'instant, nous ne pouvons qu'admettre que cela ait existé sans plus de précision. C'est encore un point fort mystérieux.

Les artisans des bois et des cordes

Pour ce qui concerne les pyramides à degrés de la III^e dynastie, la taille moyenne des blocs entassés n'était pas encore trop importante, de l'ordre de 1 m × 0,4 m × 0,4 m, soit au maximum de l'ordre de 350 kg. Pour soulever de telles masses, une adaptation du vieux « chadouf » égyptien pour puiser l'eau a dû être mise au point : il s'agit d'une longue perche dotée d'un contrepoids et fixée de façon asymétrique entre deux perches verticales reliées par un support de bois permettant son pivotement (*cf.* fig. 5-e). L'effet de levier ajouté à l'action de cordes reliées au contrepoids et tirées par des manutentionnaires permet de soulever de lourdes charges dont d'importants volumes d'eau (100, 200 litres voire un peu plus) notamment pour remplir les canaux d'irrigation.

En 1957, près de la face sud de la pyramide de Khéops, deux grandes fosses rectangulaires furent découvertes fermées par d'immenses dalles de calcaire. La première a été ouverte. Elle contenait les pièces soigneusement démontées d'une barque royale d'apparat sans mâts mais dotée de cinq paires de rames, le tout en bois de cèdre importé du Liban. Après plusieurs années de travail, elle a été remontée pièce par pièce. Le résultat est magnifique. Elle mesure 43 mètres et il apparaît qu'elle a été assemblée uniquement avec des cordages, des tenons et des mortaises. La seconde fosse n'a pas été touchée mais explorée à l'aide de micro caméra. Son contenu est identique (*cf.* réf. 7). C'est un extraordinaire témoignage du savoir-faire des menuisiers de l'Égypte ancienne.

On peut en déduire en premier lieu que le commerce avec les bois durs du Liban ou de l'Anatolie préexistait. En deuxième lieu, les artisans du bois avaient bien les outils permettant de forer et ajuster des pièces de bois compliquées (*vide infra* § métallurgie). Enfin, s'il y avait du commerce avec le Liban, il y en avait certainement aussi avec la Mésopotamie, notamment pour importer les bitumes qui affleuraient dans cette région et indispensables pour

19. La « chèvre » est un appareil de manutention et de levage connu depuis la haute antiquité et composé le plus souvent de trois poutres (tripode), appelées hanches, disposées en pyramide triangulaire dont le sommet soutient une poulie (ou un axe de coulissage) dans laquelle passe une corde ou élingue manœuvrée à l'aide d'un treuil. Au temps de la III^e dynastie, la poulie n'existait pas.

le calfatage des bateaux, surtout ceux destinés au transport des monolithes en granit d'Assouan. Ceux-ci nécessitaient de solides barques capables de les transférer et de les supporter. Si leur forme avait conservé celle des barques légères en roseaux ou papyrus, il était nécessaire de pouvoir disposer d'une solide plateforme lorsqu'il s'agissait de descendre le fleuve pour les transporter. De plus, il fallait y fixer un mât supportant une voile carrée maintenue et orientée par des cordages tressés à partir de fibres de roseaux ou de papyrus lorsqu'il fallait remonter le courant du Nil pour retourner à Assouan. La construction d'une de ces barques est parfaitement illustrée dans l'ouvrage d'Aude Gros de Beler (Mastaba de Ti, V^e dynastie, Saqqarah - page 107, cf. réf. 3)²⁰. On y distingue parfaitement les ciseaux (ou burins) ainsi que haches et herminettes pour ôter les aspérités de la coque du navire.

Choisir le site d'un mastaba ou d'une pyramide

Les mastabas et autres pyramides étaient essentiellement des temples funéraires ayant pour objet de protéger le roi-dieu et sa famille dans l'au-delà. Selon le texte des pyramides, il était gravé : « *Tu ne t'éteindras pas, tu ne finiras pas, ton nom durera auprès des hommes. Ton nom viendra à être auprès des dieux.* » Bref, le lien entre les vivants et l'au-delà. Ceci explique bien le luxe de précaution que les architectes ont pris pour que les tombes soient inviolées. Malheureusement, elles le furent presque toutes !

Revenons à Saqqarah. Le complexe funéraire de 15 hectares est clairement situé sur la partie la plus plane du plateau rocheux situé en face de Memphis l'ancienne capitale des pharaons sur la rive orientale du Nil (**Figure 3**). Devant la pyramide à degrés, la surface a été parfaitement aplanie. Le mastaba initial a donc été élevé avec une hauteur 8 mètres à partir d'une surface parfaitement plane, sachant que les tombes et salles étaient déjà cachées en profondeur. Pour ce faire, une simple rampe d'accès était suffisante pour transporter les pierres calibrées d'une cinquantaine de centimètres de hauteur. L'empilement de chaque couche est parfaitement horizontal. La surface supérieure du mastaba initial était certainement plane et particulièrement soignée. Lorsque Djéser se rendit compte que du fait du mur d'enceinte le site perdait sa signification symbolique, il ordonna d'élever le monument par degré successif jusqu'à la forme que nous connaissons.

Imhotep après cet ordre examina la situation. La première assise étant stable et aplanie, la deuxième devait l'être tout autant. Pas de problème, la carrière de pierre étant à proximité et approvisionnée, il suffisait d'allonger et de rehausser la rampe d'accès. Et là le génie d'Imhotep se fait jour puisqu'il calcula le décalage et la hauteur pour que la forme finale soit celle d'un escalier

20. D'autres illustrations de navires se trouvent dans le même ouvrage en référence 3.

Les sites des pyramides de la III^{ème} et IV^{ème} dynasties

(Carte IGN 3615 série Marco-Polo 1/1 000 000)

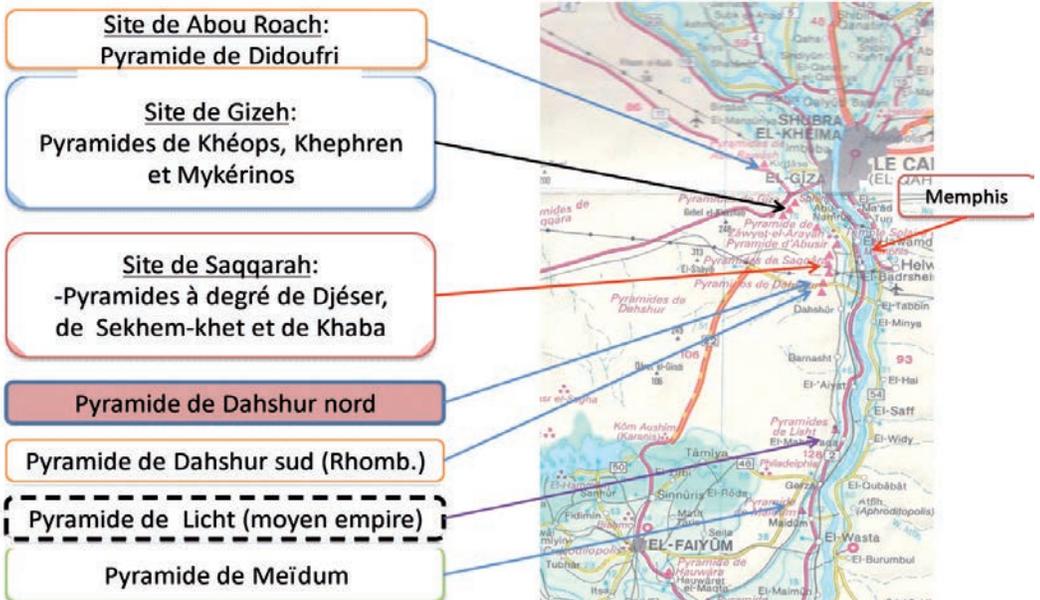


Figure 3. Sites des principales pyramides sur les plateaux rocheux qui dominent le cours du Nil. De la pyramide de Didoufri (IV^e dynastie), il ne reste que des vestiges. La pyramide de Licht (Moyen Empire) est ici mentionnée car c'est la seule où des vestiges d'une rampe d'accès ont été trouvés. Memphis était l'ancienne capitale des pharaons.

géant matérialisant l'ascension du pharaon vers le domaine du vivant. Ainsi est né le concept de la pyramide²¹. D'entrée, l'angle virtuel de l'apothème de la pyramide à degré était de 51°50' (**Figure 4**) ce qui implique que le rapport de la longueur de l'apothème sur la moitié de la longueur de la base est très proche du nombre d'or (1,617) (**Figure 7**). L'équilibre de la forme finale vue de loin était trouvé, mais la pyramide n'était qu'une succession de mastabas de tailles décroissantes construites les unes sur les autres, chacune d'elle ayant environ dix mètres de hauteur. Mais cette rigueur sur la planéité de chaque base a assuré le parfait équilibre et la stabilité dans le temps... jusqu'à ce jour ! Mais ce n'était pas encore une vraie pyramide à parois lisses.

Ensuite, compte tenu de la taille somme toute modeste des blocs de pierre utilisés, il n'est pas impossible qu'à partir du deuxième degré, plusieurs

21. Cf. la référence 7, page 47.

Période de construction: de 2650 à - 2500 soit environ 150 ans
(Djéser à Mykérinos, III^{ème} et IV^{ème} dynasties)

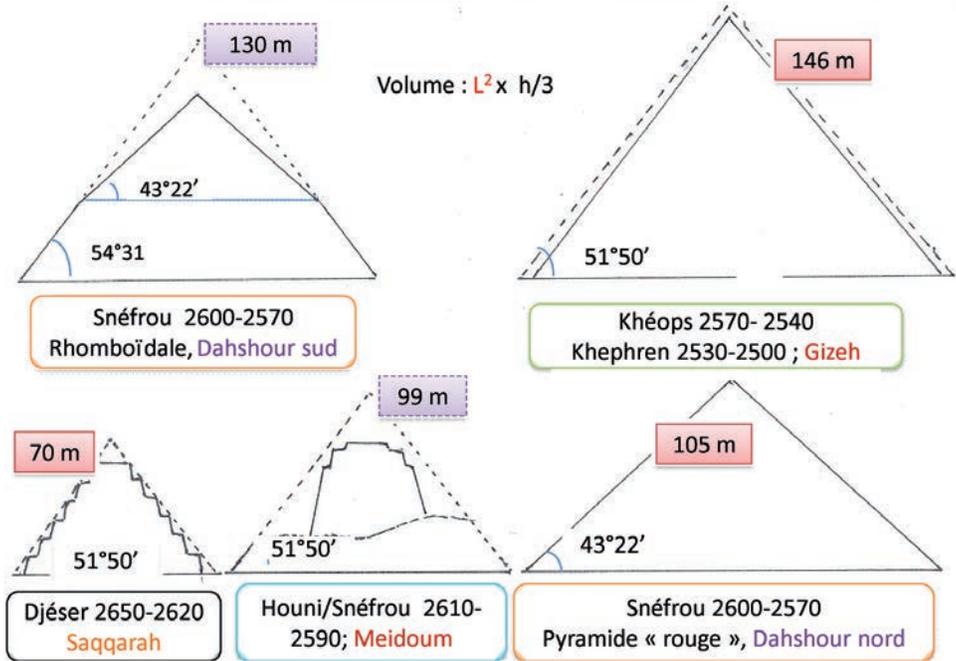


Figure 4. Profils des six principales pyramides avec les angles de pente. En paroi lisses, la pyramide de Djéser aurait culminé à 70 m, celle de Meidoum à 99 m. La pyramide de Dahshur (ou Dahshour) culmine actuellement à 105 m. Si la pente (54° 31') avait été maintenu jusqu'au bout, cette pyramide aurait atteint 130 mètres de hauteur (en pointillé). Le profil initial de la pyramide de Khéops est également en pointillé. Celui de la pyramide de Khéphren est en trait plein.

« chadoufs » (**Figure 5e**) avec de solides cordages sur chacun des paliers devaient suffire pour acheminer les blocs nécessaires sur une dizaine de mètres de hauteur. Il apparaît que les parois de chaque degré, ou de chaque mastaba superposé, ont une pente de 70° environ. Il y avait donc déjà un souci d'éviter leur effondrement compte tenu du poids de l'ensemble. Pour assurer la planéité de la base et celle de chacune des couches, il est fort vraisemblable, bien que nous n'ayons pas de preuve archéologique, que les menuisiers de l'époque étaient en mesure de construire d'assez grands « pyramidions de bois » (**Figure 5b**) en bois d'acacia suffisamment légers et robustes pour être déplacés sur le chantier. Posé dans une zone donnée, il suffisait que le fil à plomb soit parfaitement situé au centre de chaque appareil pour que la surface soit parfaitement plane. Pour vérifier la planéité de grandes surfaces, il suffisait

L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)

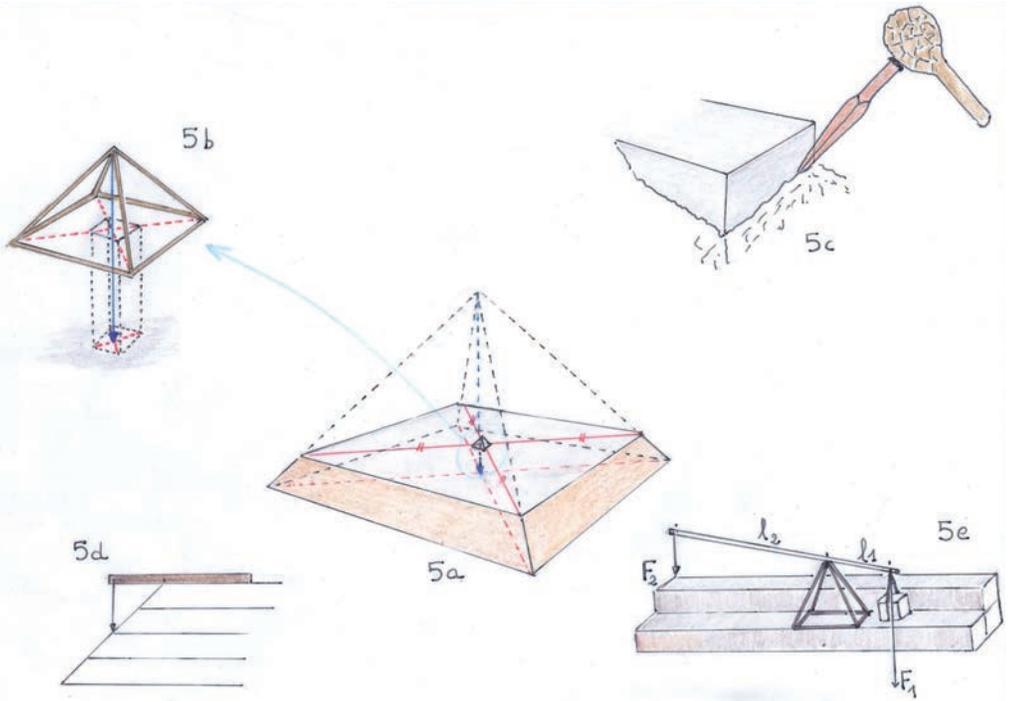


Figure 5. **5-a.** représentation schématique d'une pyramide en cours de construction ; **5-b.** pyramidion en bois pour vérifier la planéité des surfaces et le centrage d'une pyramide dont le centre a dû être préalablement marqué (?). Cela impliquerait de laisser un puits de contrôle au centre géométrique de la pyramide. Dans le cas du centrage, le pyramidion est relevé à chaque nouveau niveau, le fil à plomb devant être parfaitement vertical et descendre jusqu'à la base de la pyramide. À partir de ce fil à plomb, les quatre distances vers les quatre angles doivent être rigoureusement égales [notées en rouge sur la figure (5-a) représentant une pyramide en construction] ; **5-c.** burin en cuivre durci avec un maillet en bois d'acacia séché et taillé ; **5-d.** fil à plomb ou « merkhet » destiné en particulier à vérifier les angles de chaque face (apothème) et de chaque arête ; **5-e.** représentation du bras de levier (le « chadouf » des Égyptiens) permettant de soulever de lourdes charges ; À ce propos, Archimède aurait dit à un ouvrier ne pouvant soulever une lourde charge : « donne moi ta place, je soulèverai la terre ! » et lui fit la démonstration du bras de levier. Si l_1 est égale à 2 m et l_2 à 6 m un bloc de 150 kg peut être équilibré par un contre poids de 50 kg à l'extrémité de l_2 . Bien entendu, il faut que la perche de 8 m de long soit suffisamment solide pour ne pas se rompre au point d'appui. [$F_1/F_2 = l_2/l_1$ ou $F_1 \times l_1 = F_2 \times l_2$].

de juxtaposer plusieurs de ces « pyramidions de bois » combinée avec des appareils de visées (« bay »). De même, avec les fils à plomb (« merkhet »), il était aisé de vérifier à l'aide de repères sur le bois horizontal, l'angle d'une paroi donnée (**Figure 5d**).

À la recherche de la forme idéale : la pyramide de Meïdoum

À ce stade de l'Histoire, Imhotep venait de construire une superbe pyramide visible de loin tout en étant protégée par une enceinte de 10 mètres de haut. Or, Imhotep aurait survécu à Djéser environ une bonne vingtaine d'année²² (**Figure 1**). Compte tenu de son talent de bâtisseur, dans un premier temps, il a dû être chargé de construire des tombeaux des successeurs de Djéser dont on sait peu de choses (Sékhem-khet, Khaba et Qahédjet, appelé aussi Houni)²³ si ce n'est que leurs règnes respectifs furent courts. Les tombeaux des deux premiers se situaient à Saqqarah au cœur de deux pyramides à degrés dont il ne reste que les infrastructures en grande partie enfouies sous les sables.

De ce fait, il n'est pas aberrant de faire l'hypothèse suivante : avec une équipe d'architectes/ prospecteurs formés et encadrés par ses soins, Imhotep a dû prospecter systématiquement d'autres sites rocheux offrant une planéité comparable à celle de Saqqarah tout en étant pas trop éloignés de Memphis. Ces sites (Meïdoum, Dahshur et Gizeh) (**Figure 3**) une fois repérés, ont été aplanis et préparés soigneusement par une véritable « armée d'ouvriers », structurée et organisée afin d'être ensuite capable de construire à grande échelle des pyramides tout en recherchant la meilleure technique pour obtenir la forme idéale d'une pyramide à parois lisses. C'était vraisemblablement **son idée, son objectif, son rêve** ! Il n'est pas interdit de le penser.

Le premier site expérimental fut celui de la pyramide de **Meïdoum**. Cette pyramide, la plus méridionale des grandes pyramides, a la particularité d'être à la fois la dernière pyramide à degrés et la première à pentes lisses. Ce fut un essai raté et pourtant significatif de l'énergie mise en œuvre pour atteindre la perfection des formes. De plus, elle marque également un tournant : le tombeau n'est plus creusé en profondeur dans la roche comme celles à degrés de Djéser (vide infra),

22. Toutes les dates indiquées sont celles reportées dans le livre de JP. Adam et C. Ziegler (livre édité en 1999, réf. 7). Toutefois des études récentes sont en faveur d'un règne de Djéser beaucoup plus long (- 2691 ; -2625). Il paraît raisonnable de penser qu'Imhotep a travaillé sous les ordres de Djéser au moins le temps de terminer le complexe funéraire de Saqqarah soit au moins une trentaine d'année. Imhotep aurait vécu de -2650 ? à -2600. Il aurait donc survécu de 20 ans à Djéser et travaillé une quinzaine d'année sous le règne de Snéfrou. De toute façon, une datation précise de ces règnes est un exercice très difficile. Gardons l'hypothèse raisonnable qu'Imhotep ait vécu à la fois sous les deux règnes de Djéser et Snéfrou compte tenu des trois fourchettes de dates mentionnées ci-dessus.

23. On sait très peu de chose des successeurs de Djéser, sinon qu'ils ont eu des temps de règne très courts. La pyramide de Meïdoum aurait été construite entre le règne de Qahédjet (ou Houni) et celui de Snéfrou, 1^{er} pharaon de la IV^e dynastie.

*L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)*

de Sekhem-khet ou de Khaba²⁴. Ainsi, à Méïdoum, la tombe royale est semi enterrée au cœur de la pyramide et recouverte par une superstructure par l'encorbellement d'énormes dalles superposées avec un léger débord afin de supporter l'énorme masse de la pyramide (**Figure 6**). Cette technique de voûte par encorbellement ayant fait ses preuves, elle sera reprise et améliorée pour les pyramides suivantes (Dahshur sud et nord, Khéops et Khéphren). En ce qui concerne Khéops, le plafond du grand couloir incliné menant à la chambre du roi a été construit sous ce principe en cumulant les difficultés pour ajuster en encorbellement et en inclinaison d'énormes dalles.

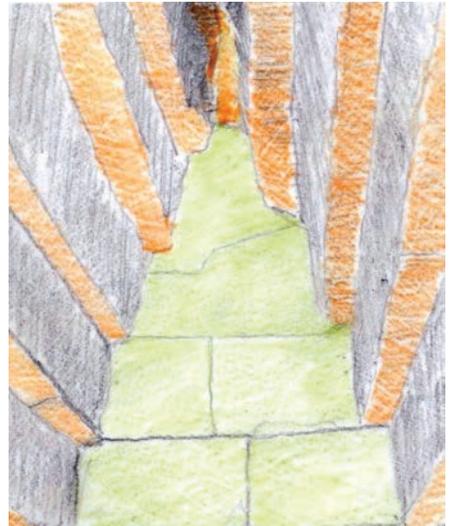


Figure 6. Représentation schématique de la technique de la construction de voûte en encorbellement (dessin inspiré de la chambre funéraire de la pyramide de Méïdoum (cf. réf. 7).

Sans doute influencé par la méthode qu'il avait mise en place pour le mastaba de Saqqarah qui consistait à construire un noyau carré central afin d'y adosser des rangs de blocs calibrés par couche successives dans les quatre directions de l'espace jusqu'à obtenir la taille voulue, il a repris vraisemblablement ce concept à Méïdoum pour la pyramide attribué à Houni/Snéfrou²⁵. Mais cette fois, le noyau central s'élève d'un seul jet jusqu'à 60 m de hauteur comme le montre clairement les déblaiements de la face est (cf. réf. 7, p. 110). Les deux degrés supplémentaires portent la hauteur de cet ensemble à environ 75 m, lui donnant cette forme étrange et unique qui domine l'immensité du désert et qui rappelle un peu les « tours du silence » de l'antique Perse en Iran. Ce noyau central, parfaitement construit, a résisté au temps malgré la pente de 70° de chacune des parois. Toutefois dans la masse des déblais qui l'entoure, un parement lisse ayant une pente de 51°50' a été découvert en un endroit qui correspondrait à la base d'une pyramide à paroi lisse qui aurait culminé à 99 m de hauteur soit plus d'une vingtaine de mètres au dessus du niveau actuel (**Figure 4**).

Cette particularité est intéressante à plus d'un titre : au fur à mesure que le noyau central s'élevait, les quatre faces avec parement lisse étaient construites simultanément par couches successives s'adosant autour de ce noyau central, l'apport des matériaux se faisant sans doute à l'aide d'une rampe d'accès au

24. Pyramides inachevées dont il ne reste que peu d'éléments au-dessus du sol.

25. En réalité, seul le nom de Snéfrou apparaît sur des inscriptions qui semblent être datées du nouvel empire.

moins pour le premier tiers de la hauteur. Mais les maîtres d'œuvre ont dû rencontrer une difficulté imprévue : celle d'être sûrs que les quatre arêtes de la pyramide allaient pouvoir se rejoindre parfaitement au sommet.

En effet, les maîtres d'œuvre se seraient-ils rendus compte que les arêtes des quatre angles n'allaient pas se rejoindre, alors qu'ils avaient atteint environ le quart de la hauteur (25 m) théorique de ce qui aurait dû être la pyramide à parois lisses recouvrant le noyau central ? Ce n'est pas impossible, car le noyau central plus avancé en hauteur empêchait tout contrôle par visée directe entre les quatre coins.

Toujours est-il qu'elle est restée inachevée et que les débris qui entourent la pyramide à degrés visible de nos jours ne sont pas dus à un effondrement de la partie additionnelle mais au pillage des carrières du Moyen Âge. S'attaquer à des parois ayant une pente de 70° étant beaucoup trop dangereux, la pyramide de Meïdoum telle qu'elle est aujourd'hui a défié le temps ! Les pillers craignaient à juste titre que le ciel leur tombe sur la tête !

La décision d'abandonner a dû être très rapide car les maîtres d'œuvre avaient en réserve sur le site de Dahshur, deux emplacements appropriés prêts pour la relève qui avaient en plus l'avantage d'être plus proches de Memphis.

Les deux pyramides expérimentales à parois lisses de Dahshur (ou Dahshour)

Une vue d'ensemble du site, proche des rives du Nil, montre clairement sa grande planéité. Ces deux grandes pyramides sont très différentes d'aspect, la première au sud est rhomboïdale avec deux pentes (54°31' puis 43°22'), la deuxième au nord, dite « pyramide rouge », est une vraie pyramide à faces lisses – la première de toute – mais moins pentue (43°22') ce qui lui donne un aspect plus trapu. Celle-ci servit toutefois de tombeau à Snéfrou. Ces deux pyramides ont pourtant beaucoup de points communs :

1. Les blocs de pierres, de taille raisonnable, ont manifestement été prélevés sur site. Celles de la pyramide « rouge » sont en calcaire chargé de sel de fer (ocre rouge) qui lui donne son aspect.

2. À la base de chacune d'elles, une assise plane émerge à certains endroits. Elle est constituée par des grands blocs très finement ajustés et de couleur différente des autres blocs de pierre de la superstructure. Le contraste est très net. Ces blocs d'assise sont parfaitement visibles (*cf.* réf. 6, p. 119 pour la « rhomboïdale », p. 122 pour la « rouge »). D'autres photos parues dans différentes revues confirment cette particularité.

3. Les caveaux royaux sont jumelés et situés au cœur de chaque pyramide. Leurs voûtes sont à encorbellement comme à Meïdoum mais plus hautes et dotées de blocs de plus grande taille et mieux ajustés. Pour la

*L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)*

rhomboïdale, la première est sous le niveau du sol, tandis que la deuxième qui communique avec la première est construite à partir du socle. Pour la « rouge », les deux caveaux sont côte à côte et communiquent entre eux.

4. Les descenderies vers ces caveaux sont exigües et très pentues. Leurs entrées dans les faces sont masquées par des bouchons qui les rendaient en principe invisibles.

5. Les parements sont en calcaire blanc de Tourah. Ceux de la « rhomboïdale » ont été préservés à cause de la forte pente (même crainte qu'à Meïdoum). Il en subsiste quelques rares vestiges sur la « rouge » (à moins qu'ils ne soient les vestiges d'essais de restauration).

De cet ensemble d'éléments, on peut aisément déduire que ces deux pyramides constituaient deux chantiers expérimentaux afin de trouver la meilleure formule de construction. La pente choisie pour la première (rhomboïdale), 54°31' devait lui donner une forme très élancée puisque, si elle avait été menée à son terme en maintenant cette pente, elle aurait culminée à 130 mètres de hauteur au lieu de 105 actuellement. Ses bâtisseurs arrivés au tiers de la hauteur théorique ont dû être effrayés par la pente et sans doute ont-ils perçu des signaux leur indiquant une possible fragilité de l'ensemble. Cependant, ils ont pu vérifier que la méthode choisie de construction (base parfaitement horizontale, empilement horizontal couche par couche, parement extérieur en calcaire blanc posé au fur et à mesure de l'élévation, contrôle des pentes de chacun des angles) devait être la bonne. La base correspondant au niveau de la rupture de pente étant parfaitement plane à plus de trente mètres de hauteur, ils ont poursuivi la construction avec un angle plus sage (43°22') et ils ont parfaitement réussi **à ce que les quatre arêtes se rejoignent en un point matérialisé par le sommet du pyramidion sommital sans qu'il puisse y avoir au préalable un repère le matérialisant (point virtuel).**

C'est tout simplement fascinant.

Une telle exactitude suppose qu'à chaque niveau les pierres des quatre angles ne subissent aucune variation d'angle de pente et que les droites qui les relient se croisent rigoureusement au centre et ce avec une précision très élevée. Le centre de la pyramide devait donc être également défini dès le départ avec une très grande précision. Ceci explique notamment, pour la pyramide de Khéops, la précision inouïe de la base, un carré parfait, ce qui a suscité de nombreuses questions mathématiques voire scientifico-philosophiques. Comment était-ce possible ? En réalité, il fallait surtout définir son centre afin qu'à chaque couche, il soit rigoureusement au dessus du point initial sur la base carrée et en fin de compte en dessous du point de jonction des quatre arêtes (pyramidion virtuel) (cf. **Figures 5a et 5b**).

En conséquence, la méthode mise en place à Dahshur sud fut par la suite une règle d'or à respecter.

L'autre particularité de ces deux pyramides, consiste en une première assise horizontale constituée de très grands blocs parfaitement jointifs et en matériaux très différents des blocs qui s'empilent au dessus (vide infra). Ces énormes blocs ont des contours verticaux qui semblent suivre le terrain tandis que la surface a été taillée pour être parfaitement plane. C'est comme si ces énormes blocs avaient été coulés puis parfaitement finis en surface. On retrouve ce même type de différence de matériaux pour les premières assises de la pyramide de Khéops qui se distinguent fort bien des autres blocs empilés de cette pyramide. C'est cette particularité qui a conduit le chimiste Joseph Davidovits²⁶ à émettre en 1978 l'hypothèse que les très gros blocs des pyramides seraient en fait constitués par du calcaire aggloméré et traité comme un béton. Les égyptiens les auraient coulés s'appuyant les uns contre les autres en se servant, pour les parois libres, de coffrages en bois. Dans ces coffrages, ils auraient versé un pâte constituée en grande majorité par une poudre de calcaire naturel prélevée sur site et mélangée à un liant fait d'eau, de chaux éteinte et de natron (carbonate de sodium naturel très présent au nord ouest de Gizeh) l'ensemble produisant in situ de la soude qui avec la silice ou la kaolinite ajoutée forme un « géo-polymère » qui en séchant conduit à une pierre dure, sorte de béton artificiel (cf. **encadré ci-dessous**).

26. DAVIDOVITS (Joseph), *Ils ont bâti les pyramides*, Éd. J-C. Godefroy, Paris, 2002, et DAVIDOVITS (Joseph), *La nouvelle histoire des pyramides*, Éd. J-C. Godefroy, Paris, 2004.

Les géo-polymères ou pierres artificielles

Joseph Davidovits en 1978 a émis l'hypothèse selon laquelle le calcaire argileux broyé, naturellement présent sur les lieux de la construction des pyramides, a été mélangé dans de l'eau avec à un liant essentiellement constitué de carbonate de sodium (natron) et de chaux. Ce mélange, versé sur place dans des moules, se serait alors solidifié pour former une pierre ré-agglomérée, aussi solide qu'une pierre naturelle. C'est effectivement une technique pour élaborer aujourd'hui des pierres reconstituées. Dans le chantier d'une pyramide, les pierres déjà présentes en dessous et sur deux ou trois côtés constituaient des parois naturelles du moule. Il suffisait de remplacer les cotés manquants par des panneaux de bois étanches. Après ajout du mélange ci-dessus et plusieurs heures de séchage, une nouvelle pierre était en place pour servir d'appui à une nouvelle et ainsi de suite. Ceci expliquerait les joints des pierres d'une finesse incomparable. Toutefois cette théorie a soulevé beaucoup de polémiques. Les points positifs et négatifs sont résumés ci-après :

Les points négatifs :

- Il n'y a pas de document archéologique permettant de valider cette hypothèse,
- Pourquoi fabriquer des pierres artificielles alors que les plateaux sur lesquels les pyramides ont été construites sont des carrières naturelles. D'ailleurs de nombreux archéologues ont souligné avec à propos que les pyramides de Gizeh ont été placées en creux par rapport au niveau naturel du sol ce qui laisse à penser que beaucoup des pierres constitutives ont été auparavant débitées sur place et stockées à proximité en vue de la construction.
- La température nécessaire pour fabriquer la chaux vive (850°-900°) à grande échelle aurait nécessité une consommation de bois incompatible avec les maigres ressources existantes. De

L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties (2680-2470 avant J.-C.)

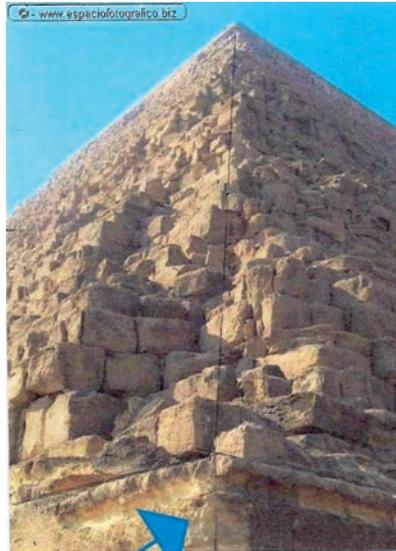
même, une exploitation importante du natron aurait logiquement laissé des traces durables.

- Les blocs constitutifs des pyramides antérieures à celle de Khéops sont par leur taille et leur morphologie des pierres naturelles locales. C'est aussi le cas pour les blocs de plus grande taille des pyramides de Khéops et de Khéphren dont la morphologie s'apparente à celle des roches calcaires du plateau de Gizeh.
- La pyramide de Mykérinos, postérieure à celle de Khéphren, est constituée entièrement par des blocs de granit en provenance d'Assouan.

Les points positifs :

- Pourtant, comme le fait remarquer Davidovitz, les énormes blocs du soubassement de la pyramide de Khéops ont une structure où les petits coquillages ne sont pas répartis de façon homogène en strates régulières. Au contraire, ils sont plus densément présents sur la partie inférieure des blocs traduisant ainsi une sédimentation du mélange versé. Au contraire la partie supérieure du bloc de pierre, un peu moins dense par suite de la sédimentation avant solidification complète, a été plus sujette à l'érosion des vents de sables de cette région. C'est visible sur plusieurs photographies prises sur le site de Gizeh (cf. le site Google Earth) **Figure 9**.
- De plus, il est clairement montré que ces grandes dalles du soubassement des pyramides épousent le moindre relief en creux de la roche naturelle. C'est particulièrement net sur une photographie de la base de la pyramide rhomboïdale de Dahshur (cf. p. 119 de la réf. 7).
- De même, l'extrême finesse des joints et l'extraordinaire ajustement des blocs avec des angles irréguliers auraient nécessité pour chaque bloc un long travail de sculpteur incompatible avec les rendements de construction.
- Si l'utilisation de la chaux vive à grande échelle est contestable (vide supra), celle du plâtre (sulfate de calcium hémi-hydraté - $\text{CaSO}_4, 0,5\text{H}_2\text{O}$), obtenu par chauffage à 130 °C du gypse naturel (sulfate de calcium di-hydraté - $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est fort possible. Le mélange de gravier de roche calcaire, de sable et de plâtre constituait un mortier sommaire qui était à la portée des constructeurs de pyramides.

En résumé, l'hypothèse de pierre reconstituée est vraisemblable pour le soubassement des pyramides au moins à partir de celles de Dahshur afin de donner aux pyramides une base près précise et parfaitement plane. Pour l'instant, les éléments scientifiques qui permettraient de valider définitivement cette hypothèse séduisante sont malheureusement encore trop fragmentaires. Un groupe d'études scientifiques et archéologiques à l'échelle internationale sous l'égide du ministère égyptien des monuments antiques serait indispensable pour lever le doute. Il est vrai que dans le contexte actuel cela paraît pour l'instant difficile.



Photographie de la base en angle de la pyramide de Khéops (cf. le site de « Google Earth » donnant plusieurs vues de la pyramide de Khéops : www.espaciofotografico.biz). La flèche bleue a été ajoutée pour souligner les parties érodées anormalement.

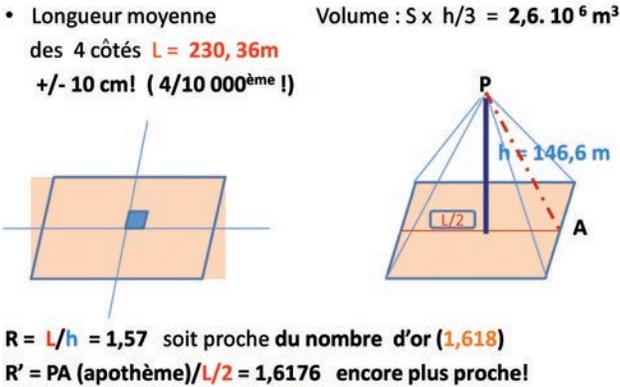


Figure 7. La planéité de la base de Khéops est parfaite et les dimensions de chaque côté de la base sont égaux à 10 cm près. Le rapport entre l'apothème PA avec la moitié d'un côté de la base ($L/2$) est égal à 4/1 000^e près au nombre d'or.

Cette hypothèse est séduisante et pas impossible au moins pour la première assise : il suffit de dégager en creux la surface de la base prévue, puis d'y couler la pâte selon la méthode précédemment décrite. Quand celle-ci est encore suffisamment liquide, elle assure par le niveau de l'eau une surface parfaitement plane qui est ensuite reproduite de proche en proche. Il suffit d'en parfaire le fini pour obtenir une base parfaitement plane sur laquelle il est aisé de dessiner les repères avec une très grande précision dont le futur centre de la pyramide. Les contrôles de planéité de toute la base devaient se faire avec les pyramidions de bois déjà évoqués et un certain nombre de visées assurées par les « bays ». Toutefois, pour couler ces blocs, il fallait d'une part transporter d'importantes quantités d'eau depuis le Nil et disposer de suffisamment de chaux éteinte et par conséquent de chaux vive, laquelle ne peut être produite qu'à haute température (800 °C environ) avec une trop forte consommation de bois pour ce pays semi-désertique. De ce fait, il est beaucoup plus vraisemblable que la chaux ait été remplacée par le gypse déshydraté (plâtre) qui implique des températures beaucoup plus basses pour le produire (environ 190 °C environ, cf. encadré pages 22-23).

L'âge d'or des grandes pyramides : Khéops et Khéphren

À la fin du règne de Snéfrou, les équipes des bâtisseurs de pyramides maîtrisaient l'essentiel des savoirs-faire nécessaires : la taille de la pierre, le transport et ajustage de très grands blocs en encorbellement pour supporter l'énorme poids de chaque pyramide au dessus des caveaux, la maîtrise des assises horizontales, l'empilement de blocs de pierres de taille moyenne

*L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)*

provenant de carrières proches du site à l'aide de systèmes de levage avec des cordages sur des plans inclinés en bois complétés peut-être par des contrepoids coulissants et/ou de « chèvres » (vide infra). De plus, au moins dans la première partie du chantier jusqu'au tiers de la hauteur, une large rampe d'accès devait permettre l'accès au chantier de plusieurs équipes parfaitement structurées avec tous les corps de métiers nécessaires. En moins d'un siècle tout était en place pour réaliser les chefs-d'œuvre que sont les deux pyramides de Khéops et de Khéphren.

Khéops, successeur de Snéfrou, décida avec ses architectes que son tombeau serait encore plus grand et le plus beau de tous. Le site choisi fut celui de Gizeh (ou Giza) proche du Nil et du delta fertile où résidait déjà une population nombreuse et donc une main-d'œuvre aisément mobilisable. Les dimensions de la base (230,33 m de côté), l'angle de l'apothème (51°50') et *de facto* la hauteur de la pyramide (146,60 m) furent choisis pour battre des records tout en donnant l'équilibre de la forme puisque le rapport de la longueur de l'apothème sur la demi-base ($230,33/2$) est très proche du nombre d'or, soit 1,6176 au lieu de 1,618 ! (**Figure 7**). Son volume, surface de la base multipliée par le tiers de la hauteur, était à l'origine de 2,594 millions de m³ ce qui implique, avec une densité de la pierre calcaire comprise entre 2,6 et 2,7, un poids total d'environ 6,9 millions de tonnes (*vide infra* la note en bas de page 1) !

C'est vraiment la pyramide de tous les superlatifs, d'autant plus que la conception de l'intérieur cumule de nombreux défis : un caveau souterrain creusé dans la roche, un long couloir ascendant au cœur de la pyramide se divisant en deux, l'un horizontal débouchant sur la chambre dite de la reine, l'autre ascendant vers la chambre sépulcrale du roi. Ce couloir, la grande galerie montante longue de 46,6 m et haute de 8,53 m avec des parois en encorbellement comme dans les caveaux des pyramides de Dahshur, faisait sans doute office d'antichambre. Sa construction a demandé des trésors d'ingéniosité et des efforts colossaux pour placer et ajuster en encorbellements des blocs de granit inclinés. La construction de la chambre du roi, tout en granit avec un plafond plat constitué d'énormes blocs de granit de 40 à 60 tonnes surmonté de cinq chambres de décharge superposées toutes couvertes de la même façon. Seul le plafond de la plus haute comporte des poutres de granit inclinées en chevron. Ce dernier est situé à 68 mètres par rapport à la base de la pyramide. Un travail de titan !

Si l'on se réfère au livre de Jean-Pierre Lauer (*cf.* réf. 5), certaines de ces poutres pèsent plus de 150 tonnes (entre 150 à 400 tonnes). Par conséquent, il n'y a pas d'autre hypothèse que celle qu'il a proposée, à savoir l'existence d'une rampe d'accès. De mon point de vue, quand elle a atteint 68 mètres de hauteur, sa longueur totale devait être de l'ordre de 600 m afin de garder une pente raisonnable de 10 % ce qui correspond à une inclinaison de 6°. C'est déjà

considérable ! Combien d'hommes ont été mobilisés, combien d'accidents y a-t-il eu, combien de souffrances et d'épuisements ont laminé ces ouvriers de l'impossible, nous ne le saurons sans doute jamais.

Le prix humain a certainement été considérable car, pour la pyramide suivante, celle de Khéphren²⁷, toutes ces innovations pharaoniques ont été sagement abandonnées. Les concepteurs sont revenus à des solutions éprouvées avec une chambre funéraire semi-enterrée dotée d'un plafond constitué d'énormes poutres de granit en chevrons et pour l'élévation de la pyramide un empilement de blocs de calcaires réguliers, dont les dimensions tendent à diminuer dans le quart supérieur de la pyramide. L'angle choisi de l'apothème est un peu plus élevé, soit 53°10. L'équilibre des formes est excellent car le triangle carré constitué par la demi-base ($215 \text{ m}/2 = 107,5$), la hauteur (143,5 m) et l'apothème (178,514 m) constitue un « triangle sacré » de l'Égypte ancienne et dont les proportions relatives sont 3, 4 et 5²⁸. Par contre, le rapport de l'apothème sur la demi-base s'écarte un peu du nombre d'or : 1,66 au lieu de 1,6176. Néanmoins, elle reste magnifique²⁹. À son sommet, elle a heureusement gardé une partie de son parement d'origine et l'on imagine la lumière et la beauté de toutes ces pyramides au temps où elles venaient d'être construites.

Conclusion

À ce stade, à la suite de nombreux travaux et études, la plupart des solutions décrites pour expliquer la construction des pyramides sont, soit prouvées, soit raisonnablement possibles. Mais il reste la « pierre d'achoppement » déjà évoquée au début de ce texte. Comment les architectes et « ingénieurs » de ces deux dynasties ont-ils fait pour déplacer et ajuster des poutres pesant plusieurs centaines de tonnes afin de les disposer soit en chevrons soit à plat ou encore en encorbellement ? S'il fallait refaire aujourd'hui de telles opérations, d'énormes grues seraient nécessaires pour placer au millimètre près des blocs les uns par rapport aux autres où la moindre erreur de placement peut se traduire par des blocages irréversibles. Cela demanderait

27. En ce qui concerne la pyramide du pharaon Didoufri (Djédef Rê), successeur direct de Khéops, à Abou Roach, soit elle fut inachevée compte tenu de la brièveté du règne de ce pharaon, soit elle a été complètement détruite par les carriers du Moyen Âge. Dans ce massif rocheux, une immense cavité fut au préalable creusée, destinée à recevoir la descenderie et la chambre funéraire.

28. Si l'on divise les trois côtés respectivement par 3, 4 et 5, on trouve le même rapport soit 35,7 +/- 0,1. Par exemple, si l'on divise la hauteur ($143,5/4 = 35,8$ et l'hypoténuse (ici l'apothème) $178,51/5 = 35,7$.

29. Pour beaucoup plus de détails sur ces deux célèbres pyramides, il suffit de se reporter aux références 5 et 7.

*L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des III^e et IV^e dynasties
(2680-2470 avant J.-C.)*

à notre époque un personnel hautement qualifié et des moyens considérables... voire pharaoniques !

Les faits sont là. Les pyramides défient toujours le temps. Pas de doute, les Égyptiens de l'antiquité ont réussi de véritables tours de force. De nouvelles découvertes archéologiques ou bibliographiques nous offriront-elles de nouvelles pistes pour les expliquer complètement ? Pour l'instant, les pyramides conservent encore une part de leurs mystères

Pour ma part, je garde à l'esprit trois points éclairants. *Tout d'abord*, dans la première partie du long règne de Djéser, la basse et la haute Égypte étaient réunies et contrôlaient de vastes territoires dont l'ancienne Nubie et sans doute bien au-delà. L'or et les matières précieuses recueillis permettaient de nombreux échanges commerciaux notamment avec au nord les territoires qui recouvrent le Liban et la Palestine actuels mais aussi la Mésopotamie et les territoires Hittites. *En deuxième lieu*, et de ce fait, l'essor économique a été le facteur déterminant pour promouvoir de nouvelles techniques artistiques (poteries et bijoux) mais aussi stratégiques (métallurgie d'alliages en cuivre durci pour les armes et les outils). Cette prospérité jointe au pouvoir religieux et temporel d'un pharaon puissant et visionnaire a permis l'éclosion de talents exceptionnels tels que celui de l'architecte Imhotep mais surtout une organisation sociale sans faille et prospère sans laquelle ces merveilles d'équilibre n'auraient pu voir le jour. *Enfin*, la magie du Nil, source de vie renouvelée au milieu des semi-déserts environnants, a élevé les esprits vers le ciel et les dieux.

C'est bien là le symbole des pyramides. ■

