

La construction de la Grande pyramide

La seule méthode plausible

La Grande Pyramide de Khéops, première des sept "Merveilles du Monde" et seule encore existante, a toujours suscité de la fascination. Curieusement, aucune explication satisfaisante n'a jamais été proposée pour savoir comment elle a été construite. Toutes les théories qui ont été proposées à ce jour sont défailtantes car elles laissent sans réponse deux interrogations majeures. La première est comment a été construite la zone comprise entre la base de la Chambre du Roi au niveau + 43 m et le sommet de la pyramide. La seconde concerne la montée et la mise en place des poutres de 25 à 65 t de cette même chambre. La méthode logique et cohérente proposée résout ces deux problèmes en respectant les connaissances des anciens Egyptiens, ainsi que les techniques et les moyens prouvés de cette époque. D'abord, c'est l'utilisation de la rampe intérieure droite à quart tournant, ce "chaînon manquant" qui offre le moyen de construction de la pyramide le plus économique. Ensuite, le système à contrepoids est l'outil indispensable pour le levage et la mise en place des lourdes pierres de la Chambre du Roi.

■ INTRODUCTION

Solidement implantée sur le plateau de Gizeh, la Grande Pyramide de Kheops (photo 1) domine le Nil depuis plus de 4 600 ans et curieusement sa construction reste inexplicable. Aucun plan ni écrit de l'époque ne nous étant parvenu, les seuls témoignages anciens dont nous disposons apparaissent dans les récits d'auteurs ayant vécu bien plus tard, principalement dans ceux d'Hérodote et de Diodore de Sicile.

Le premier évoque – dans la "*Relation de voyage en Egypte*" écrit vers l'an 450 avant J.-C. – la construction de la pyramide "telle qu'elle lui fut racontée" grâce à l'utilisation de machines permettant d'élever les pierres d'assises en assises. Une disposition particulière des blocs, soit en crossai (pierres en saillies), soit en bômides (pierres formant socle), est à la base des théories défendues par les "machinistes".

Le second rapporte – dans le livre I, S.II, art. XV de la Bibliothèque Historique écrit au cours du I^{er} siècle avant J.-C. – que la pyramide fut construite au moyen de levées de terre. Il en est résulté un grand nombre de propositions faites par les "rampistes".

Finalement ces textes ont surtout eu une énorme influence dans la façon d'aborder le problème de la construction de la pyramide, privilégiant des solutions qui "collaient" à l'un ou l'autre de ces récits au détriment de l'essentiel : une analyse précise du monument et des ouvrages intérieurs qu'il comporte.

Une seule chose est sûre : la pyramide est là et il a bien fallu la construire!

Aussi, c'est avec l'approche de professionnels



© Georges Mesmin

Photo 1
Vue de la pyramide de Kheops
View of the Cheops Pyramid

de l'acte de construire que nous avons abordé le problème :

- ◆ d'une part, il y a la pyramide, un bâtiment gigantesque mais qui n'est finalement que le résultat de l'accumulation d'une succession de couches horizontales de blocs de pierre plus ou moins travaillés ;

- ◆ d'autre part, il y a les couloirs intérieurs et les chambres funéraires, avec certains blocs de granite – pouvant peser jusqu'à 65 t – mis en place à plus de 60 m de hauteur.

Les techniques de construction ne sont donc pas les mêmes, tout particulièrement pour le transport et le levage des blocs : ceux de 1 t et ceux de 65 t ne requièrent pas les mêmes moyens. Finalement le projet doit être traité comme deux chantiers distincts intimement liés l'un à l'autre.



Cette démarche amène à aller plus loin dans la réflexion : certains ouvrages intérieurs n'ont peut-être eu qu'un rôle provisoire lié au procédé de construction, ou bien leur forme définitive a-t-elle été influencée par des obligations techniques liées à ce dernier ?

Par exemple, la présence de la Grande Galerie – ouvrage grandiose mais inséré de manière insolite entre deux couloirs de faible section – doit pouvoir s'expliquer autrement que par les raisons actuellement avancées.

Ou encore, la Chambre de Reine – inachevée et comportant des conduits qui débouchent nulle part – devait-elle réellement avoir un rôle funéraire ?

De même, la Chambre des Herses ne semble pas être optimisée pour un rôle de barrière incontournable à l'entrée de la Chambre du Roi, sachant de plus que les bouchons de granite au bas du couloir ascendant barraient déjà efficacement l'accès. Enfin, l'analyse du plan et de la coupe de la pyramide est très révélatrice : la superposition et l'alignement de ces mêmes ouvrages intérieurs dans la partie nord de l'édifice répondent à l'évidence à des raisons constructives.

Par contre les récits anciens doivent avoir leur part de vérité et ils ne sont, peut-être, que les fragments d'un processus plus complexe. En sériant les problèmes, il devient alors possible de reconstituer le puzzle du chantier.

Mais remontons un peu dans l'Histoire et faisons le point sur l'état des connaissances techniques acquises et les moyens disponibles à la veille de l'ouverture du chantier.

■ LES PREMIÈRES PYRAMIDES

Construite à Saqqarah sous la III^e dynastie pour le pharaon Djoser par le fameux architecte Imhotep, la première pyramide est un mastaba transformé en pyramide à degrés. L'ensemble funéraire fut creusé directement dans le sol, la grande nouveauté étant l'utilisation de la pierre comme matériau de construction pour la superstructure en remplacement de la brique crue : l'architecture de pierre était née, mais la technique restait simple.

Puis sous Snéfrou – premier pharaon de la IV^e dynastie – trois pyramides, véritables laboratoires technologiques, ont été réalisées :

- ◆ la première, à Méïdoum, initialement à degrés, fut transformée à la fin des travaux des deux suivantes en pyramide véritable. Ses deux innovations sont le long passage maçonné en superstructure reliant l'entrée à la chambre funéraire, et la couverture de cette chambre grâce à une technique révolutionnaire : la voûte en tas de charge – appelée à tort mais de manière plus imagée voûte en encorbellement – pouvant supporter une charge très importante ;
- ◆ la deuxième, la Rhomboïdale de Dahchour, fut

commencée avec une pente de 62° ramenée très rapidement à 55° ; des problèmes de stabilité, apparaissant à mi-travaux, conduisirent à revoir les plans. La pente fut une nouvelle fois réduite – à 43° environ – et les blocs du corps et ceux de façade mis en place horizontalement. La partie funéraire est plus conséquente avec une antichambre et deux chambres funéraires, dont une complètement dans la masse de la pyramide ; l'ensemble est relié par des galeries à deux entrées en façade. Enfin, le mortier au gypse y fit son apparition ;

◆ la troisième, la Rouge de Dahchour nord, est la mise en œuvre des avancées acquises précédemment. Les architectes optèrent, par précaution, pour une pente de 43°, et réalisèrent une pyramide véritable parfaite. La qualité de la partie funéraire fut améliorée et totalement intégrée dans la masse de la pyramide. Elle réunit enfin les deux objectifs recherchés : un monument imposant avec son complexe funéraire au cœur de sa superstructure.

Grâce aux connaissances acquises, la voie était ouverte aux architectes de Kheops pour qu'ils se lancent dans le projet de la Grande Pyramide.

■ LES MOYENS TECHNIQUES

Ne connaissant pas de matériau assez résistant pour faire des axes – le fer n'étant pas encore exploité – les Egyptiens ne se servaient ni de la roue ni de la poulie. Ils construisaient donc avec des moyens rudimentaires et compensaient ce handicap par une remarquable organisation de chantier. Sommairement résumé ils utilisaient :

- ◆ des outillages lithiques : masses et marteaux en diorite, forets et lames de pics en silex et divers instruments en quartzite ;
- ◆ des outillages en cuivre pur : scies, hachettes, herminettes et ciseaux. L'usure très rapide de ces outils imposait une gestion rigoureuse des matériaux travaillés ;
- ◆ des outillages en bois : leviers, chèvres, rouleaux, rondins et surtout traîneaux, moyens de transport habituels des charges. L'absence de forêt dans la région obligeait les concepteurs à économiser le bois qui était importé. Les Egyptiens étaient d'excellents marins – ils utilisaient des barques naviguant sur le Nil pour le transport des poutres de granite venant d'Assouan – et ils en tirèrent un savoir précieux au niveau du travail du bois et de la fabrication des cordages ;
- ◆ des cordes et cordages : pour les instruments de levage, le halage des traîneaux, l'assemblage des pièces de bois et l'appareillage des outils ;
- ◆ des couffins en feuilles de palmier ou en herbes d'alpha et des paniers en osier pour le transport des matériaux : sable, gypse, mortiers, débris de carrière et remblais ;
- ◆ enfin, la brique crue pour le revêtement des chaussées et le limon du Nil comme lubrifiant.

■ LES MOYENS HUMAINS

Le transport des blocs de pierre était une tâche primordiale et le traîneau tracté par un attelage humain en était l'élément clé : des centaines de traîneaux tirés par des milliers d'hommes étaient de ce fait nécessaires. Par contre la disparité des charges à déplacer impliquait des méthodes différentes, l'augmentation du nombre de tireurs étant limitée par le problème de leur coordination et par la place disponible.

En analysant les capacités de l'être humain, on s'aperçoit que le rendement énergétique est très différent suivant le type d'effort demandé : s'il est faible pour un halage lent et continu de plusieurs heures, il devient beaucoup plus important pour une traction en force de quelques minutes. L'homme peut ainsi exercer une force d'environ 20 kg dans le premier cas, et 4 à 5 fois plus dans le second. Les Egyptiens, adeptes du tir à la corde – un bas relief représentant une joute a été retrouvé à Saqqarah – devaient savoir parfaitement appliquer cette technique pour leurs grands travaux.

Un autre facteur très important est également à prendre en compte : l'inclinaison de l'espace de traction. Au-delà d'une pente à 10 %, le rendement énergétique chute très rapidement, la limite devenant l'incapacité du haleur à déplacer son propre corps. Trois exemples résumant parfaitement les données dont disposaient les architectes, surtout en ce qui concerne le déplacement des charges les plus lourdes :

1. Il faut dix hommes par tonne pour un halage continu sur une pente à 8 %.
 2. Il n'en faut que trois pour une traction brève à l'horizontale.
 3. Il en faut quatre pour une traction brève à l'horizontale avec la charge sur une pente à 8 %.
- Ces charges devant être élevées jusqu'à plus de 60 m de haut, il est évident que l'optimisation du transport passait par une solution basée sur le troisième exemple.

Un autre élément conforte par ailleurs cette hypothèse : on estime que 4 000 hommes ont été suffisants pour construire la pyramide elle-même – sans compter tous les travaux et métiers annexes – car il aurait été difficile d'engager beaucoup plus d'ouvriers en même temps au cœur du chantier en raison de la surface disponible.

La réduction du nombre d'hommes affectés au transport des blocs était une priorité absolue et donc à la base de la conception du chantier.

■ LES MATÉRIAUX MIS EN ŒUVRE

Les trois principaux types de matériaux composant la pyramide sont d'origines très différentes :

- ◆ les blocs les plus imposants des ouvrages inté-

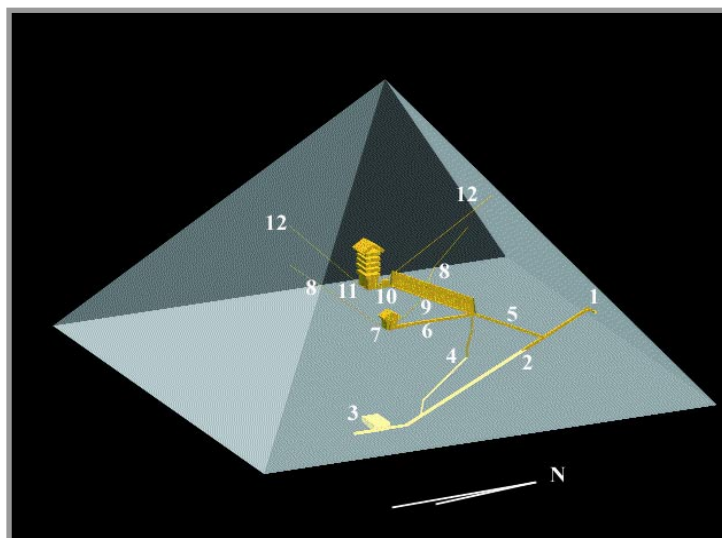


Figure 2
Vue intérieure de la pyramide telle qu'on la connaît

1. Entrée - 2. Couloir descendant
3. Chambre souterraine - 4. Puits de service
5. Couloir ascendant - 6. Couloir horizontal
7. Chambre de la Reine - 8. Conduits inférieurs - 9. Grande Galerie - 10. Chambre des Herbes - 11. Chambre du Roi - 12. Conduits supérieurs

Interior view of the pyramid as we know it

1. Entrance - 2. Descending passage
3. Underground chamber - 4. Service shaft
5. Ascending passage - 6. Horizontal passage
7. Queen's chamber - 8. Lower ducts
9. Great Gallery - 10. Chamber of Cross-beams - 11. King's Chamber - 12. Upper ducts

rieurs, en granite rose, ont été extraits des carrières d'Assouan, à plus de 900 km au sud du chantier. La lenteur de leur extraction et de leur transport – au gré des crues du Nil – avait une incidence sur le planning de chantier. Par exemple, les 72 poutres des plafonds de la Chambre du Roi n'ont pu être approvisionnées que de nombreuses années après le début des travaux. Il fallait donc pouvoir les mettre en place alors que la pyramide avait déjà atteint une certaine hauteur ;

- ◆ les blocs les plus beaux en calcaire fin de Tourah – sur la rive est du Nil – ont été utilisés pour certains ouvrages intérieurs et pour le parement de façade. La mise en place de ces derniers allait de pair avec la construction de l'assise correspondante, entraînant des impératifs au niveau de la méthode constructive ;

- ◆ les blocs de soutien et du corps de la pyramide en calcaire de Mokattan ont été extraits d'une carrière ouverte à proximité au sud du monument. Si les premiers étaient calibrés, les seconds n'étaient que grossiers car destinés au remplissage de l'édifice. Leur forme les rendait donc inadaptés à toute technique de levage d'assises en assises. Par ailleurs un constat est très important : le volume extrait de cette carrière est égal au 5/6^e du volume de la pyramide. Si la méthode constructive faisait appel à une rampe quelconque – dont le volume pouvait varier de 400 000 m³ à plus de 2 000 000 m³ suivant le type – la carrière n'aurait pas pu tout fournir, et alors la question se pose : d'où provenaient ses matériaux constitutifs ? Comme il aurait été illogique et dispendieux d'extraire des matériaux sur un autre site, de les transporter et de les évacuer en fin de chantier, la solution technique employée devait permettre tout simplement de réemployer ceux de la rampe.

Enfin, la brique crue, le sable, le mortier au plâtre et le bois ont été également largement employés sur le chantier à titre complémentaire ou provisoire.

■ COMPOSITION DE LA PYRAMIDE (figure 2)

Les dimensions générales de la pyramide sont les suivantes : une base de 230,60 m de côté, une hauteur de 146,70 m, un angle de 51,50° et environ 210 assises pour un volume de 2,6 millions

de m³. Sa structure est composée, depuis l'extérieur vers l'intérieur, d'une façade en blocs finement dressés – aujourd'hui disparus –, d'une maçonnerie de soutien en blocs taillés et appareillés, et d'un corps rempli de blocs grossiers liés par un mortier au plâtre. Cette composition hétérogène, du moins jusqu'au niveau + 120,00 m environ, montre que la pyramide n'est pas le résultat d'un empilement de blocs parfaitement calibrés. Jusqu'à une période récente, on pensait que la pyramide pesait environ 6,5 millions de tonnes pour une densité moyenne de 2,5 t/m³ ; on sait maintenant que celle-ci est plus proche de 2 t/m³. Les vides des ouvrages intérieurs et le mauvais appareillage des blocs dans le corps de la pyramide expliquent en partie cette différence, ainsi que peut-être des vides inconnus.

Les trois chambres funéraires, la première souterraine et les deux autres au cœur de la masse, sont superposées et ont toutes leur mur est en alignement parfait. La première est taillée dans le socle calcaire, les deux autres construites en maçonnerie appareillée et couvertes de chevrons pour l'une et de plusieurs plafonds en poutres et chevrons pour l'autre. Deux conduits sud et nord partent de chacune des chambres supérieures, les plus bas ne débouchant nulle part, les plus hauts sur l'extérieur.

Trois corridors étroits et la Grande Galerie, tous sur le même axe, relient ces chambres à l'extérieur ; le premier, le couloir descendant, relie l'entrée, au niveau + 16,70 m sur la face nord, à la chambre souterraine au niveau - 30,00 m ; le deuxième, le couloir ascendant, part du premier quart du couloir précédent pour s'arrêter au niveau + 21,00 m ; le troisième, le couloir horizontal, part du haut du couloir précédent et relie la Chambre de la Reine située au même niveau ; la Grande Galerie relie le couloir ascendant à la Chambre du Roi au niveau + 43,00 m, via la Chambre des Herses. Un puits de service vertical relie le bas de la Grande Galerie au bas du couloir descendant.

■ PRINCIPAUX DÉFAUTS DES SOLUTIONS ACTUELLEMENT AVANCÉES

Par les "machinistes", c'est-à-dire permettant de monter les blocs d'assises en assises

L'utilisation de chèvres

Cette technique est difficilement applicable sur une si grande échelle car des milliers de machines sont nécessaires pour obtenir un rendement efficace, alors que la place disponible sur chaque assise est limitée et implique des manœuvres délicates et dangereuses. La composition hétérogène de la pyramide ne favorise pas ce système, si ce n'est pour

les blocs des vingt ou trente dernières assises qui sont calibrés. Aucune machine n'étant capable de lever des monolithes de soixante tonnes, le problème de leur déplacement demeure et les façades étant utilisées comme des gradins, le ravalement ne débute qu'une fois le sommet atteint. Des chèvres ont été certainement employées, mais elles ne sont pas à la base d'une méthode, leur utilisation étant plutôt complémentaire d'une autre technique.

L'utilisation de leviers

On imagine très mal la pyramide enveloppée par un essaim d'ouvriers manipulant des milliers de leviers en toute sécurité, les risques de basculement étant très importants. L'expérience Nova de l'égyptologue américain Mark Lehner a prouvé l'inadaptation des leviers, sauf pour une utilisation ponctuelle.

Par les "rampistes", c'est-à-dire permettant de tracter les blocs

La rampe droite frontale unique

Elle comporte beaucoup de défauts en fonction de sa configuration : ou trop longue, ou trop volumineuse, ou trop pentue, ou pas assez large pour les assises inférieures ; de plus son utilisation est arrêtée lors de son exhaussement et son revêtement doit être reconstruit à chaque fois. Elle est intéressante, à condition de la limiter à une certaine hauteur et que son utilisation soit continue, mais elle n'est pas suffisante pour pouvoir réaliser l'intégralité du chantier.

La rampe en zigzag construite sur un remblai en appui sur une face

A son manque de stabilité il faut ajouter l'étroitesse du passage et la difficulté de faire tourner de 180° les traîneaux sur des paliers réduits. Le transport des grosses charges n'est pas possible.

Les rampes frontales multiples, appuyées sur chaque face de la pyramide

Elles sont extrêmement voraces en remblais et particulièrement difficiles à mettre en œuvre à cause de l'étroitesse des rampes. C'est multiplier les inconvénients de la rampe frontale.

Les rampes hélicoïdales extérieures en remblai enveloppant la pyramide

Malgré l'avantage de permettre l'approche du sommet avec une faible pente en utilisant beaucoup moins de remblais, de nombreux problèmes demeurent : étroitesse et instabilité du passage, rotation des traîneaux dans les angles, sécurité des hommes ; le halage des lourdes charges n'est pas possible.

La combinaison d'une rampe droite frontale suivie d'une rampe extérieure hélicoïdale

C'est la seule proposition intéressante car elle com-

bine certains avantages de chacune des deux rampes : une première rampe droite frontale réduite permet d'atteindre le premier tiers de la pyramide et d'approvisionner plus de 60 % du volume, puis une rampe hélicoïdale extérieure en prolongement permet d'arriver tout près du sommet. Mais l'avantage d'une faible pente continue et de moins de remblais n'enlève malheureusement pas les autres inconvénients des deux rampes et le problème de la provenance ou du réemploi des matériaux demeure. C'est la solution la plus généralement admise à l'heure actuelle mais elle n'est pas convaincante.

Par contre un nouveau concept apparaît : combiner au moins deux procédés, l'un prenant le relais du précédent lorsque celui-ci a atteint ses limites.

■ LES IMPÉRATIFS QU'IL EST ESSENTIEL DE RESPECTER POUR ÉTABLIR UNE THÉORIE

Un certain nombre de points paraissent essentiels :

- ◆ disposer jusqu'au niveau le plus haut possible d'une rampe en pente douce – 8 % maximum – tout en permettant de transporter les monolithes ;
- ◆ n'utiliser, pour construire une rampe extérieure et pour remplir la pyramide, que le volume connu de matériaux extraits de la carrière voisine en le réutilisant ;
- ◆ pouvoir contrôler pendant toute la durée des travaux les caractéristiques tridimensionnelles de la pyramide en laissant constamment libres les quatre arêtes, les rives des quatre faces et les quatre diagonales, éléments indispensables pour garantir une forme parfaite à la pyramide ;
- ◆ construire la pyramide par couches horizontales, et ne faire qu'environ une quinzaine de nivellements généraux pendant les travaux ;
- ◆ réaliser la majeure partie du ravalement au fur et à mesure de l'élévation ;
- ◆ utiliser des machines, mais uniquement ponctuellement et pour des besoins bien précis ;
- ◆ assurer la continuité et la sécurité du chantier.

■ NOTRE MÉTHODE LOGIQUE ET COHÉRENTE : LA SEULE PLAUSIBLE

On a vu au début de cet article que nous avons à traiter deux chantiers différents mais intimement liés : la construction de la pyramide et celle des ouvrages intérieurs. La méthode logique et cohérente que nous proposons répond parfaitement à cet objectif en se basant, d'une part, sur une combinaison de deux rampes et de machines et, d'autre part, sur l'emploi d'un contrepoids.

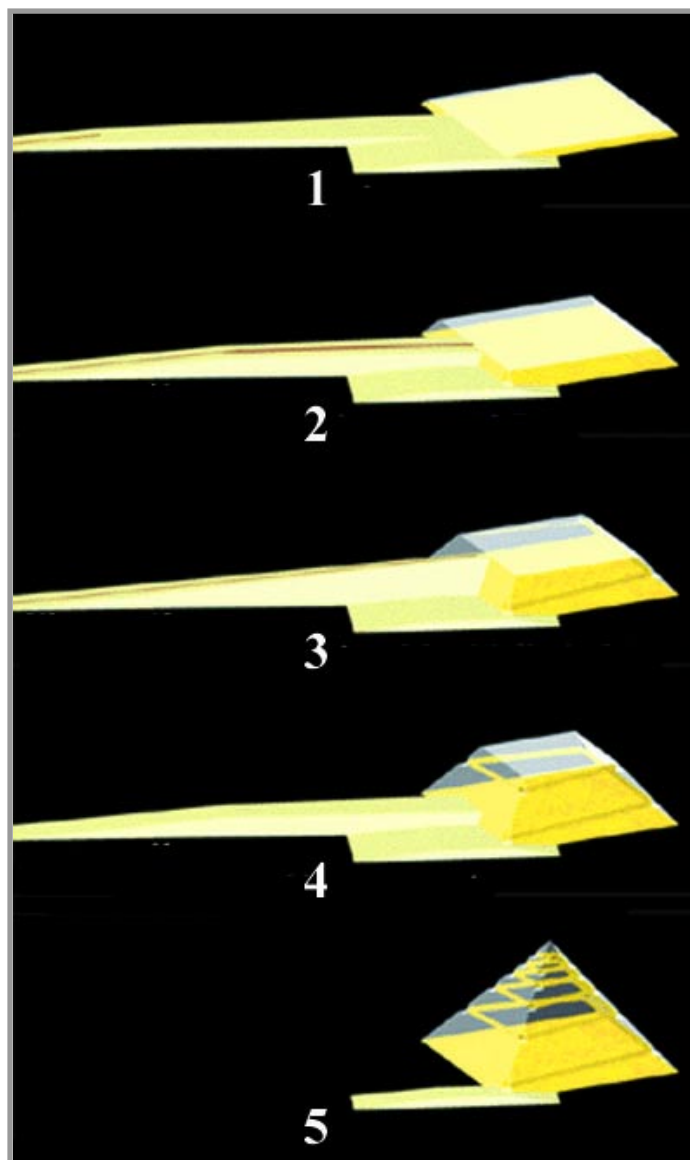


Figure 3
Principe de construction de la pyramide

1. Niveau + 7 m : Rampe extérieure en service ; point de départ de la rampe intérieure
2. Niveau + 21 m : 1^{er} palier de la rampe intérieure ; base de la Chambre de la Reine
3. Niveau + 43 m : 3^e palier de la rampe intérieure ; base de la Chambre du Roi ; hauteur maximum de la rampe extérieure ; la rampe intérieure va permettre de terminer le chantier
4. Niveau + 68 m : Démontage de la rampe extérieure en cours, réemploi de ses matériaux via la rampe intérieure
5. Niveau + 146 m : La pyramide est terminée ; la rampe extérieure a disparu, ses matériaux ayant été réutilisés pour construire la dernière partie de la pyramide

Pyramid construction principle

1. Level +7 m : Exterior ramp in operation ; starting point for the interior ramp
2. Level +21 m : 1st landing on the interior ramp ; base of the Queen's Chamber
3. Level +43 m : 3rd landing on the interior ramp ; base of the King's Chamber ; maximum height of exterior ramp ; the interior ramp will make it possible to complete the project
4. Level +68 m : Dismantling of the exterior ramp in progress, re-use of its materials via the interior ramp
5. Level +146 m : The pyramid is completed ; the exterior ramp has disappeared, its materials having been recycled to build the last part of the pyramid

La combinaison de deux rampes et de machines pour la construction de la pyramide

Une rampe extérieure (figure 3) est construite dès le début du chantier avec les matériaux de la carrière voisine ; en appui sur la face sud, elle s'élève jusqu'au niveau de la 50^e assise (+ 43 m), soit à la base de la Chambre du Roi ; d'une longueur d'environ 500 m et d'une pente de 7,5 %, elle ne dépasse pas 750 000 m³. Elle est réalisée dès le départ à sa longueur maximum et élevée par couches horizontales successives. Elle est divisée en deux voies égales décalées d'une hauteur d'assise et séparées par un socle central maçonné aménagé en chaussée de traction.

L'utilisation des voies, revêtues en brique crue, est alternée : pendant que l'une sert au transport des matériaux, l'autre et le socle central sont exhaussés de deux niveaux d'assise. Elle permet de réaliser près de 73 % du volume de la pyramide et de transporter aisément, grâce à la chaussée centrale et au contrepoids, les monolithes les plus lourds.

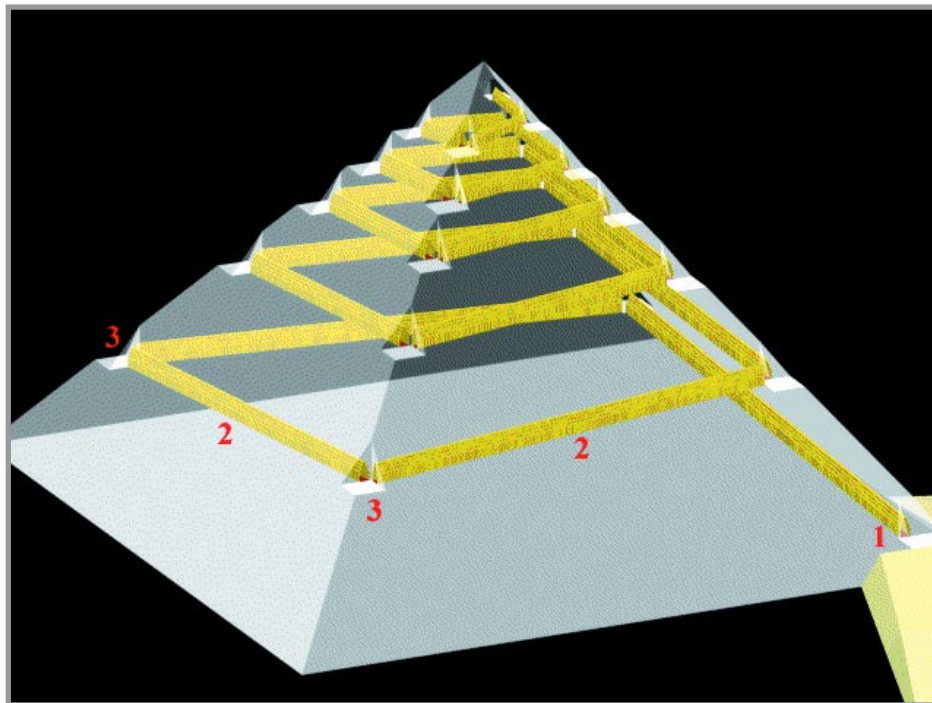


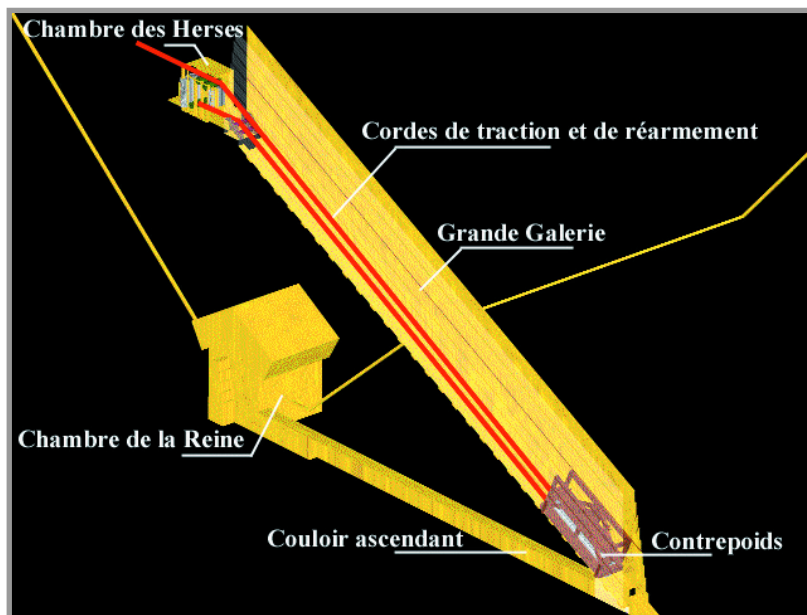
Figure 4
Rampe intérieure en spirale

1. Entrée de la rampe intérieure
2. Volée de la rampe intérieure en galerie - 3. Palier en encoche

Spiral interior ramp

1. Entrance of the interior ramp
2. Flight of stairs on the interior ramp in gallery - 3. Recessed landing

Figure 5
Le système à contrepoids de la Grande Galerie
The counterweight system of the Great Gallery



► La Chambre du Roi achevée, elle est alors démontée et la majeure partie de ses composants est récupérée pour terminer la construction de la pyramide.

Une rampe intérieure (figure 4), "chaînon manquant" entre la rampe extérieure et l'emploi de machines pour les dernières assises, est également construite dès le début des travaux. Partant près de la base (+ 7 m), elle est constituée d'une succession de 21 galeries droites de faible largeur – 2,60 m en-

viron – situées dans la maçonnerie de soutien parallèlement aux faces, au plus près de celles-ci à une distance de moins de 4 m. D'une pente moyenne de 7 %, elle est utilisable en permanence et est recouverte par une voûte en tas de charge construite au fur et à mesure de son avancement. Elle part à chaque volée d'un palier en encoche ouvert sur l'extérieur au droit d'une arête et débouche dans la paroi perpendiculaire, sur le palier d'une nouvelle encoche. De là elle repart à angle droit, comme un escalier, parallèlement à la nouvelle face jusqu'à la face perpendiculaire suivante, d'où son nom : rampe intérieure droite à quart tournant. Des "grutiers" assurent la rotation des traîneaux sur les paliers au moyen de chèvres. Le sol des galeries comporte deux sillons remplis de limon dans lesquels glissent les patins des traîneaux. Les attelages humains travaillent en toute sécurité dans de bonnes conditions de température, de ventilation – effet de cheminée – et d'éclairage – réseau de lampes à huile intégré dans les parois. Une coursive de service en bois construite parallèlement à l'extérieur permet le retour des attelages.

La rampe intérieure est utilisée concomitamment avec la rampe extérieure jusqu'à la fin de la construction de la Chambre du Roi, puis elle assure seule par la suite tout l'approvisionnement du chantier en matériaux, la dimension et le poids des blocs étant dès lors réduits. A ce stade des travaux, le volume de matériaux restant à mettre en œuvre et celui récupérable de la rampe extérieure sont quasiment équivalents. A la fin du chantier les encoches sont soigneusement rebouchées avec des blocs laissés en attente de part et d'autre de telle sorte qu'aucune différence ne soit visible.

A partir de la 188^e assise (+ 130 m) et jusqu'au sommet de l'ouvrage, il ne reste plus que 8000 m³ environ à mettre en place. Pour cela les matériaux livrés par la rampe intérieure sur un dernier palier en encoche sont élevés, grâce à une excroissance provisoire en forme de marches d'escalier, à l'aide de chèvres. Celles-ci sont parfaitement adaptées puisqu'à partir de ce niveau les blocs sont plus petits et calibrés. Le pyramidion d'une quinzaine de tonnes est introduit à l'intérieur de la pyramide avant le démontage de la rampe extérieure; il est ensuite élevé sur lui-même grâce à une chèvre spéciale, cette technique ne requérant que peu de place. Les récits d'Hérodote et de Diodore de Sicile sont ainsi tous les deux validés.

Le système à contrepoids pour la construction des ouvrages intérieurs

Il complète, grâce à la force qu'il restitue, celle produite par des attelages humains réduits manœuvrant dans le cas de figure le plus favorable évoqué : la traction brève d'une équipe travaillant à l'horizontale avec la charge sur une pente.

Ce système est articulé autour d'un contrepoids

glissant dans la gaine centrale de la Grande Galerie (figure 5) et réalisé avec les blocs de granite qui obstruent actuellement le bas du couloir ascendant. Sa course, environ 35 m, correspond à celle d'une traction et il est réarmé par une équipe à poste fixe faisant face au débouché de la Grande Galerie tandis que la Chambre des Herses sert de local technique provisoire.

Dans une première phase permettant le stockage des monolithes au niveau de la base de la Chambre du Roi, il est complété par la chaussée centrale de la rampe extérieure et par un espace de traction à l'horizontale sur l'assise concernée. Le traîneau chargé est relié simultanément au contrepoids et aux tireurs par des cordes dont une partie est segmentée par éléments de 35 m.

Le système est utilisé suivant un cycle réarmement/traction et après chaque traction un segment de cette chaîne est détaché, la partie restante étant à nouveau reliée au traîneau pour une nouvelle traction. Chaque monolithe est ainsi amené à l'aire de stockage moyennant une quinzaine de cycles.

Dans une deuxième phase (figure 6) – pour la mise en place définitive des monolithes – il est complété par une nouvelle chaussée de traction et un espace de traction à l'horizontale. Cette chaussée est élevée dans la face sud d'une pyramide intérieure érigée autour de la Chambre du Roi au fur et à mesure de la construction des plafonds de celle-ci. Un cycle suffit à la montée et la mise en place de chaque monolithe.

L'alignement des murs est de tous les ouvrages à l'intérieur de la pyramide et le décalage de 7,20 m vers l'est des axes des couloirs est justifié : les monolithes arrivent tous sur le même côté de la chambre et sont ensuite ripés latéralement et de façon dégressive vers l'ouest jusqu'à couvrir la totalité de celle-ci.

La Chambre de la Reine a peut-être eu deux rôles dans la construction : d'abord, en liaison avec le couloir ascendant, comme maquette pour expérimenter la technique du contrepoids, puis, grâce à son acoustique et ses deux conduits, comme système de transmission des ordres de chantier.

Ainsi, suivant cette méthode tous les impératifs énoncés sont respectés ; peu de matériaux ont été gâchés, d'où l'absence d'importants résidus aux abords de la pyramide – alors que 750 000 m³ de remblais ont été nécessaires pendant une partie des travaux – et l'édification de la Chambre du Roi est expliquée.

■ PREMIER INDICE DE PREUVE

En 1986/87 des recherches ont été effectuées sous l'égide de la Fondation EDF dans le but de découvrir l'existence d'une chambre inconnue à proximité de celle de la reine et d'y trouver des trésors insoupçonnés. Près d'un millier de mesures de mi-

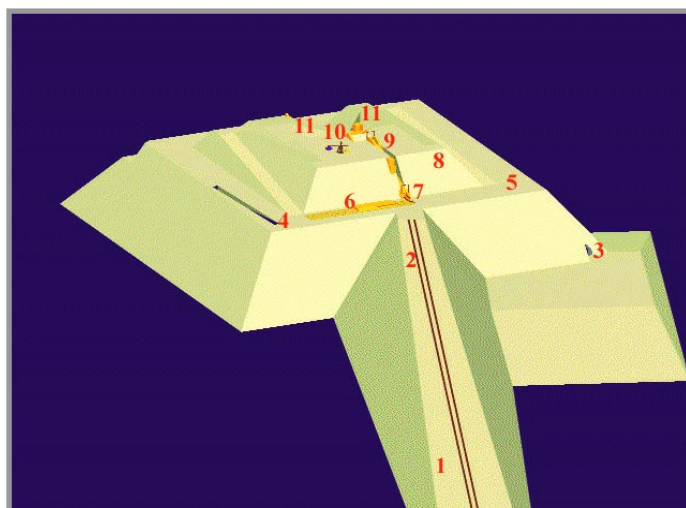


Figure 6
Chantier
niveau + 43 m

1. Rampe extérieure - 2. Chaussée centrale pour la montée des monolithes - 3. Entrée de la rampe intérieure - 4. Arrivée de la 3^e volée de la rampe intérieure - 5. Niveau + 43 m (50^e assise) - 6. Aire de stockage temporaire des monolithes - 7. Bascule de changement de pente des traîneaux des monolithes - 8. Pyramide intérieure érigée pour construire la Chambre du Roi - 9. Rampe spéciale pour la montée des monolithes - 10. Toit de la Chambre du Roi - 11. Plate-forme de traction pour les attelages

Site level + 43 m

1. Exterior ramp - 2. Central passageway for raising the blocks of stone - 3. Entrance of the interior ramp - 4. Arrival of the 3rd flight of stairs on the interior ramp - 5. Level +43 m (50th course of blocks) - 6. Temporary storage area for stone blocks - 7. Rocker for changing slope of the stone block sled - 8. Interior pyramid erected to build the King's Chamber - 9. Special ramp for raising the blocks of stone - 10. Roof of the King's Chamber - 11. Hauling platform for the teams

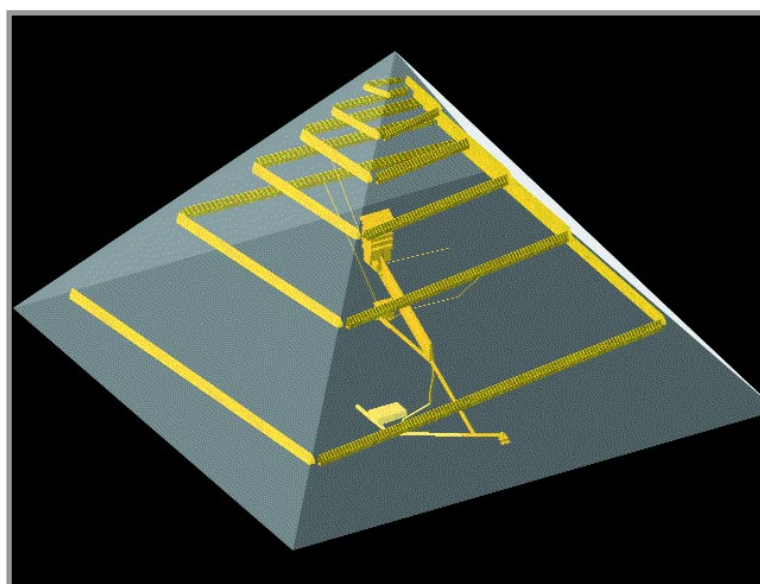


Figure 7
Vue transparente
de la pyramide
avec la rampe
intérieure
telle qu'imaginée
dans la théorie

Transparent view
of the pyramid
with the interior ramp
as imagined in theory

crogravimétrie a été pratiqué tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la pyramide.

En 2000, ignorant cette campagne, nous avons présenté notre thèse aux experts ayant vécu celle-ci. Surpris par nos plans, ils nous indiquèrent que des anomalies avaient été constatées lors du dépouillement des calculs. A l'époque, certains d'entre eux avaient émis l'hypothèse qu'il pouvait s'agir de la "mémoire" d'une rampe hélicoïdale enveloppant la pyramide. La charge de celle-ci aurait densifié, par compression, les blocs l'ayant supportée. Cette hypothèse avait paru tellement invraisemblable qu'elle n'avait pas été retenue. Seules les mentions suivantes avaient été faites au Symposium d'Athènes de septembre 1988 :

- "ces zones ne se corrèlent pas horizontalement et peuvent suggérer diverses dispositions constructives (...constructions en spirale...)" et "sans qu'il ressorte de symétrie simple autre qu'une certaine allure en spirale".

Il est alors apparu que la thèse présentée pouvait très bien en apporter une explication crédible (figure 7).



Figure 8
Anomalies détectées lors des mesures de microgravimétrie effectuées sous l'égide d'EDF en 1986/87. En rouge, les zones de forte densité correspondant à celles des pierres utilisées pour la construction de la pyramide. En vert, les zones de faible densité pouvant indiquer la présence de vide dans la construction

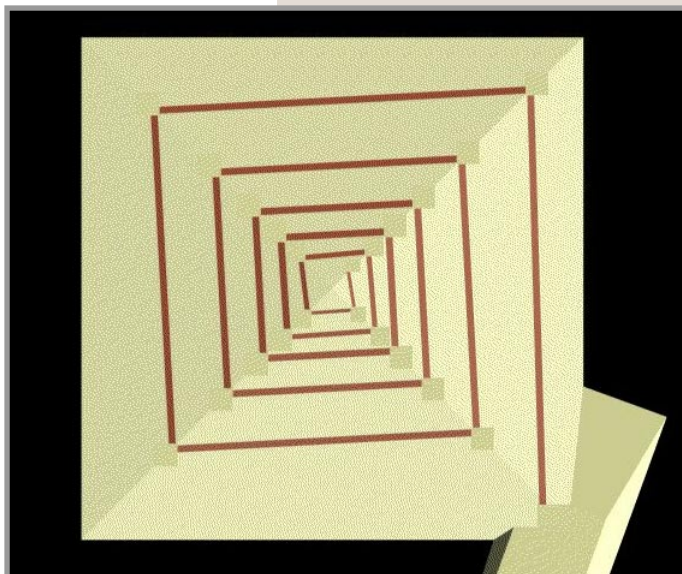
Anomalies detected during microgravimetry measurements performed under EDF sponsorship in 1986-87. In red, the high-density zones corresponding to the zones for stones used in construction of the pyramid. In green, the low-density zones which could indicate the presence of vacuum in the construction

► La superposition (figures 8 et 9) du plan d'interprétation des zones de densité et de celui de la rampe intérieure révèle une très grande similitude. Ainsi se trouverait démontrée la validité de la rampe intérieure droite à quart tournant.

Le recours à des technologies non destructives comme la sismographie, la thermographie infrarouge, la résistivité électrique ou encore le radar devrait permettre de détecter ces galeries et de prouver leur existence grâce à des microforages par lesquels seraient introduites des sondes endoscopiques.

Figure 9
Vue en plan de la rampe intérieure. La correspondance entre les zones à faible densité et la position supposée des galeries est extrêmement troublante

Plan view of the interior ramp. The correspondance between the low-density zones and the assumed position of the galleries is extremely disconcerting



ABSTRACT

Construction of the Great Pyramid. The only plausible method

J.-P. et H. Houdin

Khufu's great Pyramid, the first of the seven wonders of the World and the only one which still exists, has always aroused fascination. It is a curious fact that no satisfactory explanation has ever been presented as to how it was constructed. Such theories as have been offered to date have all been flawed in that they leave two major questions unanswered. The first of these is how the zone between the base of the King's Chamber to the level (+ 43 m) and the summit of the pyramid was built. The second concerns the beams of 25 to 65 tons used in the chamber and how they were elevated and put in place. The proposition offered here answers both of these questions. Using knowledge that we know the ancient Egyptians possessed, allied to construction techniques and means that are proven to have been at their disposal, the riddle is solved. Firstly, there is the use of the straight interior ramp which rises spirally in quarter turns. This feature provides the "missing link" and offers the most economical means of construction. Secondly, there is the counterweight system which is the indispensable tool used for lifting and setting the heavy stones of the King's Chamber.

RESUMEN ESPAÑOL

Construcción de la Gran Pirámide. El único método verosímil

J.-P. y H. Houdin

La Gran Pirámide de Keops, primera de las siete "Maravillas del Mundo" y única aún existente, ha suscitado siempre la fascinación. Curiosamente, nunca se ha propuesto una explicación satisfactoria para saber como fue construida. Todas las teorías que se han propuesto hasta la fecha presentan puntos flacos puesto que dejan sin respuesta dos interrogantes de capital importancia. La primera reside en saber cómo fue construida la zona comprendida entre la base de la Cámara del Rey en el nivel + 43 m y la cumbre de la pirámide. La segunda se refiere a la subida e instalación de las vigas de 25 a 65 toneladas de esta misma cámara. El método lógico y coherente propuesto resuelve estos dos problemas respetando siempre los conocimientos de los antiguos egipcios, así como las técnicas y medios demostrados de esta época. En primer lugar, corresponde a la utilización de la rampa interior recta de cuarto giratorio, que es el "eslabón faltante" que presenta el medio de construcción más económico de la pirámide. A continuación, el sistema de contrapeso es la herramienta indispensable para izar y colocar en su lugar los pesados bloques de la Cámara del Rey.