

Egypte 4^{ème} Dynastie

PYRAMIDE DE KHEOPS

Théorie de sa construction dite « par l'intérieur »



Jean-Pierre Houdin

Architecte honoraire

Paris, le 27 novembre 2012

KHEOPS, UN GEANT DANS LE DESERT

Par définition, une pyramide est un grand monument à base quadrangulaire dotée de quatre faces triangulaires. Pour les historiens, il s'agit d'une sépulture royale de l'Égypte ancienne. Pour l'humanité tout entière, les trois pyramides de Kheops, Khephren et Mykerinos, dressées sur le plateau de Gizeh, aux portes du Caire, en Égypte, constituent à la fois un trésor et une énigme.

De ces pyramides, on sait qu'elles furent conçues pour abriter les dépouilles de trois pharaons, près de trois millénaires avant notre ère. Si le plus impressionnant de ces colosses de pierres, la pyramide de Kheops, a été contemplé et photographié un nombre incalculable de fois, ses entrailles demeurent toujours un mystère, évocatrices de trésors fabuleux et de malédictions légendaires.

La dernière merveille du monde

On dit de la Grande Pyramide qu'elle est la dernière des sept merveilles du monde encore existante, la seule qui ait résisté jusqu'ici à la folie des hommes et à la colère des éléments. Du haut de ses 146 m, elle fut pendant plus de 4 millénaires le monument le plus élevé de l'Histoire. Et pourtant on ne sait toujours pas comment et en combien de temps elle fut construite par des hommes ne connaissant ni le fer, ni la roue, ni la poulie. Et l'on ignore aussi quelles découvertes inattendues elle pourrait bien encore receler sous ses parois de pierres.

Témoin de 4.500 ans d'Histoire, la pyramide de Kheops a vu défiler les plus grands hommes de ce monde. Des hommes qui ont admiré la démesure de ce qu'elle symbolise, qui ont rêvé de conquêtes infinies ou d'une vie immortelle. Puissants éphémères comme quidams de tous ces siècles passés sont venus arpenter ses pierres. Certains, enivrés par cette étrange sensation, se sont dit qu'une telle démesure ne pouvait être humaine et que seule une civilisation inconnue, lointaine, avait pu réaliser un tel prodige...

Le mystère de la Grande Pyramide

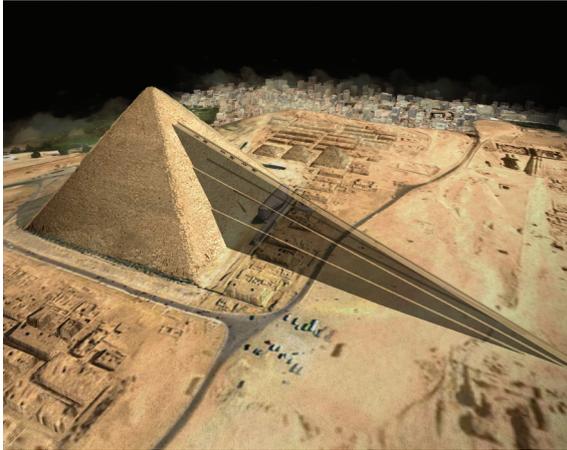
Au travers des âges, le secret de la construction de la pyramide de Kheops s'est perdu. De sa genèse on a tout imaginé, de l'impossible à l'extrême farfelu. Les véritables indices sont maigres : quelques lignes sur l'architecte royal Hemiounou, sensé l'avoir édifiée en une vingtaine d'années seulement afin que le grand Kheops puisse reposer à temps au cœur de ce vaisseau de calcaire et de granit. Un navire pour l'éternité du Roi.

Quelques phrases d'Hérodote.

Autre indice peut-être : le fameux historien grec voyagea en Égypte vers l'an 450 avant JC, soit plus de 2.000 ans après la construction de la pyramide. Il recueillit sur place les légendes locales qui ont perduré jusqu'à maintenant. Hérodote décrit ainsi dans son livre un roi tyrannique, des centaines et des centaines d'esclaves traînant des pierres et, curieusement, des machines placées à flanc d'édifice qui auraient servi à soulever des pierres d'un étage à l'autre. Quatre siècles plus tard, un autre historien grec parla, lui, d'une immense rampe frontale qui aurait permis d'acheminer tous les blocs jusqu'au sommet. D'autres évoquèrent une rampe extérieure hélicoïdale construite en briques crues qui ne résiste pas à l'analyse.

Les principales thèses proposées

La thèse des grandes rampes.



Ces immenses rampes demandent un volume de pierres quasiment équivalent à celui de la pyramide elle-même. De plus, elles nécessitent d'incessants arrêts de chantier pour être agrandies. Ces rampes sont soit courtes, mais trop pentues pour être utilisables, soit en pente douce, mais longues de plusieurs kilomètres. Et qu'est-il advenu des matériaux utilisés ? Il paraît alors déraisonnable de construire toute la pyramide avec une rampe frontale...

La thèse des machines.



C'est l'hypothèse rapportée par Hérodote : ces machines auraient permis de monter les blocs d'une assise à l'autre. Une théorie décrit aussi l'utilisation de leviers et de cales pour soulever chaque bloc d'une dizaine de centimètres à chaque poussée. Mais comment hisser ainsi des blocs de 63 tonnes ? Des hommes feraient contrepoids pour lever le bloc qui serait ensuite amené à sa position par traction ? Une opération lente, dangereuse et inopérante pour les gros blocs... En outre, ces machines nécessitent un support plat. Il faut donc ravalier la façade à la fin des travaux et les délais sont bien trop courts pour une telle tâche. Des machines ont peut-être été utilisées, mais elles ne sont pas à la base de la méthode de construction.

La thèse de la rampe en spirale enveloppante.



C'est l'hypothèse la plus populaire aujourd'hui. Une rampe extérieure en colimaçon aurait été construite autour de la pyramide. Elle possède trois avantages :

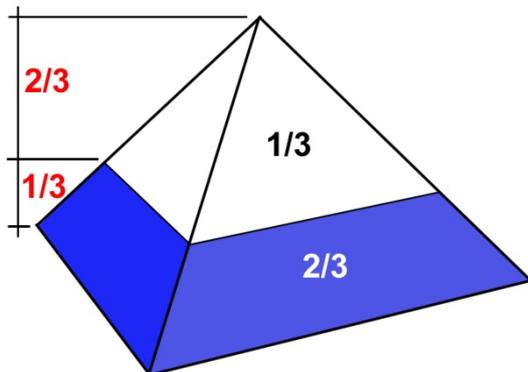
- constituée de briques crues, elle utilise relativement peu de matériaux.
- sa construction progressive suit le chantier sans trop le ralentir.
- elle offre une pente douce et constante de 8%. Pourtant, en pratique, cela ne peut fonctionner car il est impossible de contrôler la géométrie de la pyramide masquée par la présence de la rampe. De plus, la rampe est fragile et s'effondre régulièrement, la rotation dans les angles est hasardeuse et le passage est étroit. Il est hors de question d'y faire transiter les poutres de 63t.

La théorie en images

Préambule

La construction de la pyramide de Kheops se résume en deux chantiers distincts :

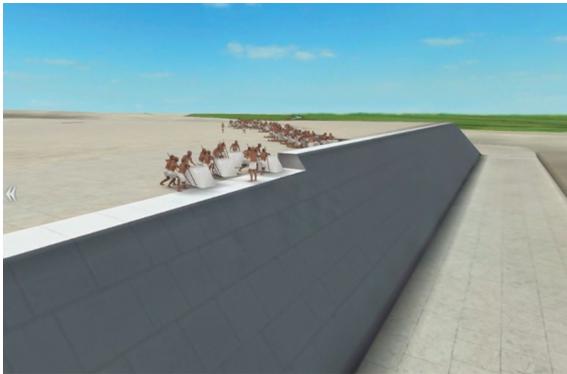
- D'une part, construire le volume de la pyramide, soit 5,5 millions de tonnes de blocs de calcaire, en tenant compte d'un paramètre majeur : tout volume pyramidal à base carrée, et ce quelque soit la pente des faces, renferme $\frac{2}{3}$ de ce volume dans le premier $\frac{1}{3}$ de sa hauteur et le $\frac{1}{3}$ restant dans les derniers $\frac{2}{3}$ de sa hauteur. L'enjeu est donc de construire le volume et d'atteindre le sommet.
- D'autre part, construire la Chambre du Roi, comportant plus de 70 monolithes, poutres en granit ou en calcaire de Tourah, pesant de 25 à 63t.



Seule la mise en œuvre de plusieurs processus indépendants permet de réaliser ces deux chantiers, le volume étant construit selon le principe de la construction par l'intérieur au moyen de deux types de rampes, une rampe extérieure et une rampe intérieure, tandis que la construction de la Chambre du Roi fait appel à un ingénieux système de traction à contrepoids.

Le principe de la construction de l'intérieur

Depuis l'origine, toutes les tentatives d'explication de la construction de la pyramide de Kheops ont échouées pour une raison très simple : la « Pensée Unique » voulait qu'elle ait été construite « de l'extérieur », comme indiqué ci-avant dans les paragraphes consacrés aux principales thèses proposées. Le basculement de l'approche constructive, en imaginant construire « de l'intérieur », balaye immédiatement tous les obstacles qui empêchaient une explication rationnelle et réaliste. Pour le premier chantier de la pyramide de Kheops, construire le volume, cette solution rapide, simple et logique permet de mettre en place tous les blocs, de la base au sommet, en garantissant la finition de la pyramide au fur et à mesure de l'élévation ; cela implique la pose des blocs de façade, déjà taillés et polis selon la pente du monument, et donc de ne jamais prendre appui dessus. Il faut alors impérativement introduire tous les blocs dans l'enceinte du monument et les poser selon une séquence bien précise assise après assise : d'abord, la rangée des blocs de façade en calcaire de Tourah parfaitement taillés, ensuite une ceinture de soutien, d'une vingtaine de mètres d'épaisseur, composée de blocs de calcaire local simplement équarris et enfin le remplissage du corps avec des blocs bruts d'extraction issus des mêmes carrières locales.

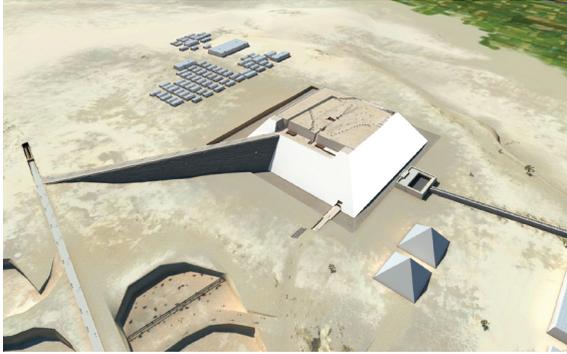


En construisant de l'intérieur, les façades sont terminées au fur et à mesure de la construction ; cela évite de revenir en fin de chantier pour surfacer 84.000m² de façades, soit des années de travaux en plus inutilement.

Les processus de construction du volume

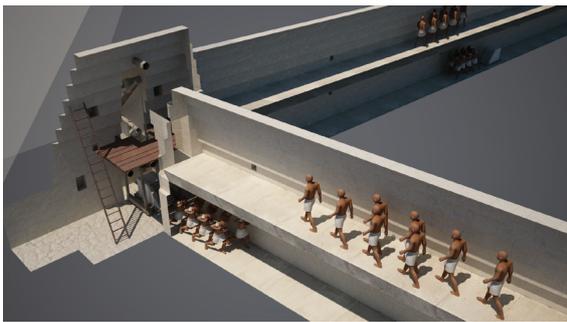
Une rampe extérieure

Cette rampe extérieure à double chaussée, en appui sur la zone Ouest de la face Sud, permet un approvisionnement massif des matériaux nécessaires pour le premier 1/3 de la hauteur de la pyramide. Limitée au niveau + 43m en hauteur, base de la Chambre du Roi, avec une pente de 8,5%, elle est relativement courte, environ 325m de longueur, ceci grâce à une utilisation astucieuse de la topographie du terrain. Elle est construite avec les mêmes blocs de calcaire que la pyramide, ce qui en fait une réserve de matériaux. A partir du niveau +43m, cette rampe se prolonge, en tranchée ouverte, dans le corps du monument en se développant par quarts tournant jusqu'au niveau +70m. Ne pouvant plus se développer au-delà de ce niveau, la rampe extérieure n'est plus utilisable et va alors être démontée ; l'ensemble rampe extérieure plus sa prolongation en tranchée aura permis d'atteindre près de la moitié de la hauteur, 85% du volume étant alors en place. Malgré qu'il ne reste plus que 15% à construire, il reste encore plus de 76m à bâtir avant d'atteindre le sommet. Un autre processus est impératif : la réponse, **la rampe intérieure**.

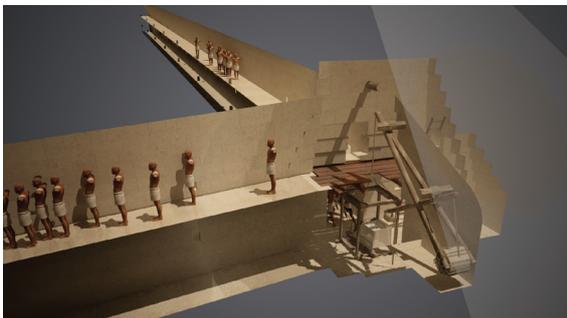


Aspect du chantier et de la rampe extérieure à l'époque de la construction de la Chambre du Roi

La rampe intérieure



Cette rampe intérieure, d'une pente d'environ 7%, est construite dès la base de la pyramide ; elle se développe sur plus de 1.800m, par quarts tournants, en une vingtaine de section pour se rapprocher du sommet. Construite avec une couverture en encorbellement, elle comporte deux niveaux : le niveau inférieur est utilisé pour la traction des traîneaux chargés des blocs de calcaire, tandis que le niveau supérieur permet le retour des équipes de traction à leur base de départ. Ces équipes sont chacune affectées à des sections de la rampe et assurent leurs tractions par des allers et retours dans leur section.



Dans les angles, les rotations de 90° pour présenter les traîneaux dans l'axe de la section suivante, sont effectuées dans des « chambres de rotation » au moyen d'une machine de levage inspirée du Shadouf égyptien. La 3D scientifique a notamment permis de valider ce système de rotation, en prenant en compte autant les aspects mécaniques que les aspects humains. Par ce système, la rotation d'un bloc prend environ deux minutes.

La rampe intérieure entre en service dès le début du chantier, les blocs de façade en calcaire de Tourah transitant par celle-ci jusqu'à leur emplacement définitif. Elle participe donc à l'approvisionnement du chantier, augmentant le débit de livraison des blocs en complément de la rampe extérieure. Lors de l'arrêt de l'utilisation de la rampe extérieure, quand la pyramide atteint le niveau de +70m, elle devient le seul moyen d'alimenter le chantier, toujours de l'intérieur, en blocs de façade en calcaire de Tourah et en blocs de calcaire local issus du démantèlement de la rampe

extérieure. Selon le principe des vases communicants, les blocs de la rampe extérieure finissent dans la partie supérieure de la pyramide, les blocs extraits des carrières ayant tous été utilisés, cela expliquant l'absence de traces de la rampe extérieure sur le Plateau de Gizeh. Aucune autre solution constructive ne permet d'arriver à ce résultat.

Enfin, la rampe intérieure est également mise à contribution lors des funérailles du Roi Kheops.

Le système de traction par contrepoids

Ce système à contrepoids permet l'élévation et la mise en place avec précision de tous les monolithes de la Chambre Roi. Ce système est basé à partir des composants suivants :

- un contrepoids glissant dans une gaine, la Grande Galerie, située dans la partie Nord de la pyramide
- la rampe extérieure en appui sur la face Sud (dans une première phase)
- une glissière spéciale, élevée dans la partie Sud de la pyramide à partir du niveau +43m pour la mise en place définitive des monolithes au niveau des cinq plafonds successifs et du toit (dans une deuxième phase)

La combinaison de ces éléments est très avantageuse car:

- l'effort à fournir par les hommes est diminué grâce à la force restituée par le contrepoids
- les hommes, n'ayant pas à élever le poids de leur corps sur une rampe, peuvent fournir un effort bref très important.



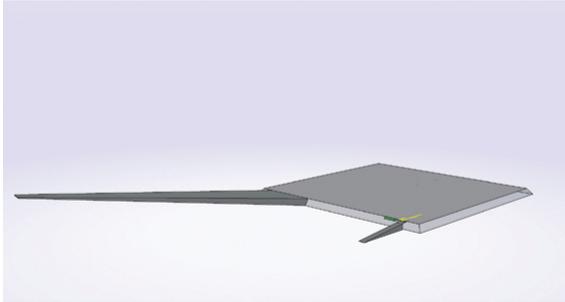
Les poutres de granit formant la Chambre du Roi sont hissées au moyen du contrepoids circulant dans la Grande Galerie et mises en place définitivement dans chacun des plafonds. Etage après étage, la chambre du Roi est ainsi construite avec l'assistance du contrepoids qui réduit considérablement le nombre d'ouvriers nécessaire.



Aspect de la face Sud à l'époque de la construction de la Chambre du Roi. Les poutres des plafonds et du toit de la Chambre du Roi, stockées au niveau +43m, sont en attente avant leur mise en place définitive grâce au contrepoids circulant dans la Grande Galerie.

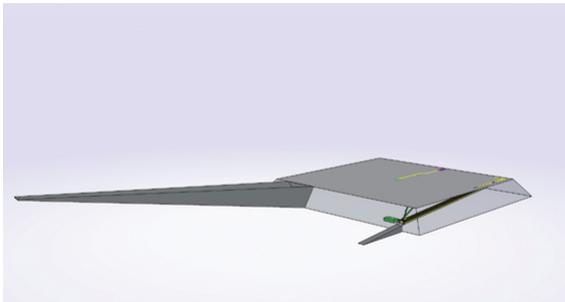
Le déroulement des deux chantiers

5^{ème} année du règne – Niveau + 7m



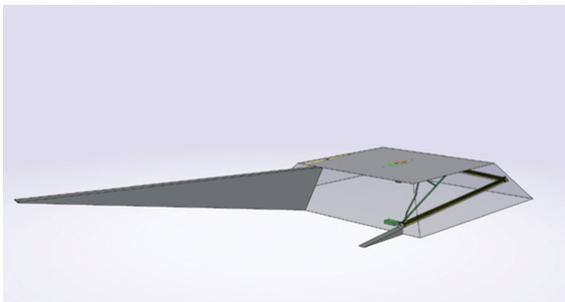
La rampe externe à double chaussée, en appui sur la zone Ouest de la face Sud, permet un approvisionnement massif du chantier en matériaux. L'entrée de la future rampe intérieure est visible dans la zone Est de la face Sud, une petite rampe extérieure permettant d'y accéder.

10^{ème} année du règne – Niveau +21m



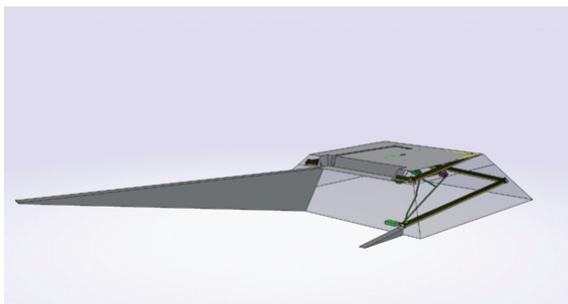
La rampe extérieure s'élève en même temps que la pyramide, le niveau de la Chambre de la Reine est atteint. La 1^{ère} section de la rampe intérieure débouche à ce niveau dans l'angle Nord/Est. La 1^{ère} chambre de rotation va être construite.

14^{ème} année du règne – Niveau + 43m



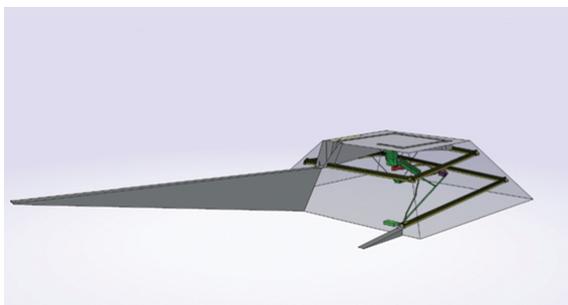
La rampe extérieure atteint son niveau maximum, la rampe intérieure, dont la 3^{ème} section arrive dans l'angle Sud/Ouest ; en raison de sa géométrie, elle ne perturbe pas l'approvisionnement du chantier. Les poutres des plafonds de la Chambre du Roi sont hissées à ce niveau avec l'aide du contrepoids circulant dans la Grande Galerie.

15^{ème} année du règne – Niveau + 55m



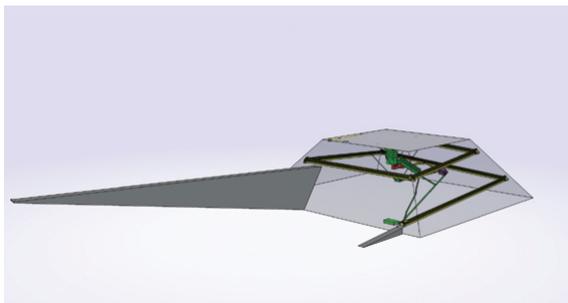
La Chambre du Roi est en construction tandis que le chantier de la pyramide se poursuit. La construction de la rampe intérieure est interrompue dans l'angle Sud/Ouest, mais reprend, pour sa 5^{ème} section au même niveau dans l'angle Sud/Est. Une 4^{ème} section horizontale raccordera plus tard les chambres de rotation dans les deux angles. Cette disposition permet à la fois le stockage des monolithes de la Chambre du Roi, la continuation des tractions des traîneaux transitant par la rampe intérieure et la prolongation de la rampe extérieure par une rampe en tranchée ouverte se développant en quarts tournants, dans le sens contraire de celui de la rampe intérieure, dans le corps de la pyramide.

17^{ème} année du règne – Niveau +70m



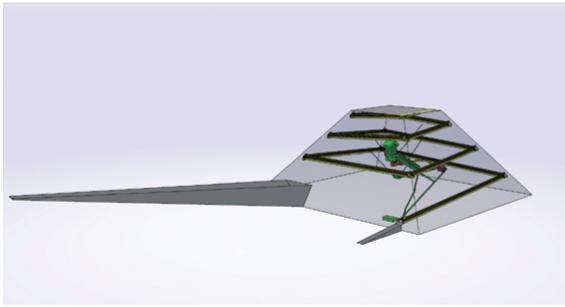
La construction de la Chambre du Roi est terminée, la rampe en tranchée en prolongement de la rampe extérieure a atteint le niveau +70m ; elle ne peut plus cheminer plus haut dans le corps de la pyramide. Une grande partie de l'aire de stockage sur la face Sud a été comblée, la majeure partie de la 4^{ème} section, horizontale, de la rampe intérieure a été construite. La 7^{ème} section coure sous la face Ouest.

18^{ème} année du règne – Niveau +70m



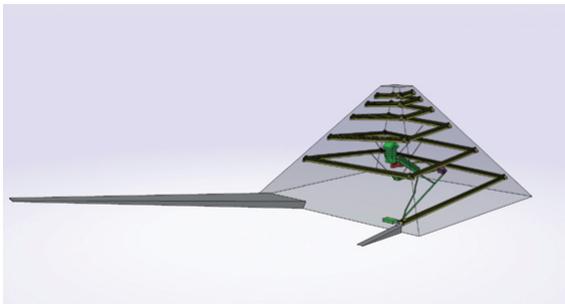
La rampe en tranchée en prolongement de la rampe extérieure a été comblée, la 4^{ème} section, horizontale, de la rampe intérieure est totalement raccordée à l'ensemble. Le démantèlement de la rampe extérieure va commencer.

20^{ème} année du règne – Niveau +100m



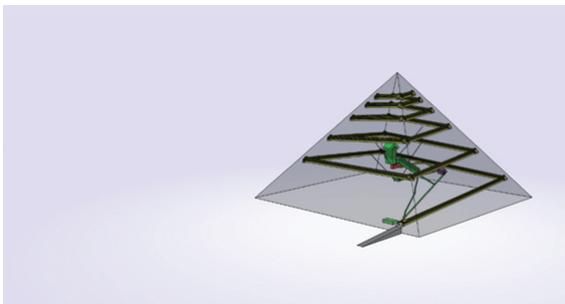
La pyramide est construite avec les matériaux récupérés lors du démantèlement de la rampe extérieure dont le volume diminue très rapidement. Tous les blocs sont dorénavant transportés en transitant par la rampe intérieure jusqu'à leur place définitive. Le rythme de la construction a beaucoup diminué, mais il ne reste que très peu de volume, 15%, à construire.

21^{ème} année du règne – Niveau +130m



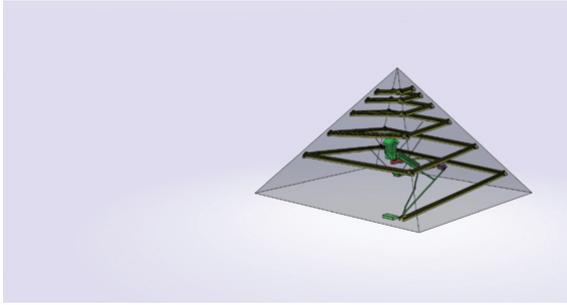
La rampe extérieure a presque disparue, la rampe intérieure est tout près du sommet, les derniers mètres seront construits grâce à un puits vertical et une machine de levage.

22^{ème} année du règne – Niveau +146m

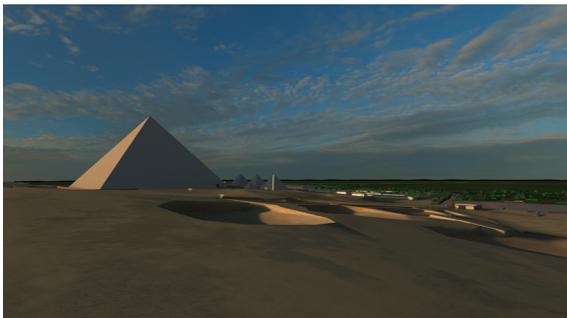


Le sommet est atteint, les travaux de parachèvement, consolidation des chambres de rotation, vont commencer depuis le sommet et en redescendant. L'entrée de la rampe intérieure reste ouverte jusqu'aux funérailles.

23^{ème} année du règne – Niveau +146m



Les funérailles de Kheops sont terminées, le Roi repose maintenant dans le sarcophage de sa Chambre funéraire au niveau +43m. L'entrée de la rampe intérieure a été bouchée et sa petite rampe extérieure d'accès a été démontée. Il ne reste plus aucune trace du chantier de construction de la Grande Pyramide de Kheops. L'énigme de sa construction peut commencer.



La Grande Pyramide devait briller sur la Plateau de Gizeh, surplombant toute la vallée du Nile, symbolisant la vie éternelle du Roi Kheops.