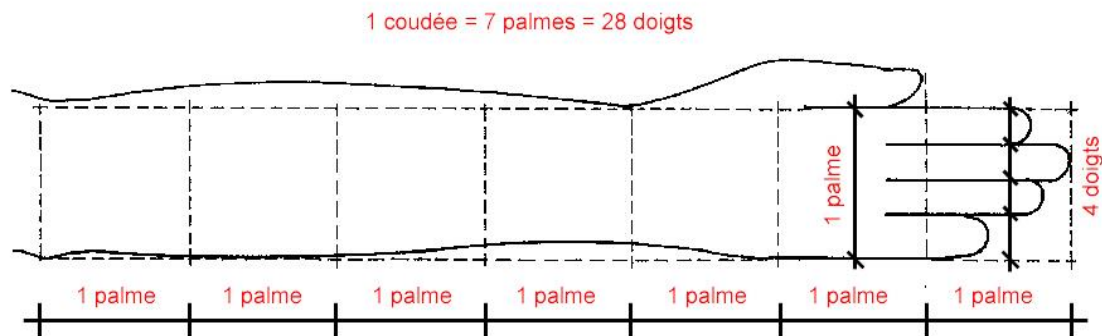


## Conception des plans de la pyramide de Kheops à partir de grilles

Un chantier de construction gigantesque comme celui de la pyramide de Kheops n'est certainement pas le résultat d'un projet conçu au jour le jour, mais bien au contraire celui d'une conception et d'une programmation décidée très loin en amont qui ne laissaient rien au hasard. En ce qui concerne la partie conception, les Egyptiens mirent au point une solution élégante et très efficace : l'utilisation de grilles (trames) basées sur la coudée Egyptienne.

D'abord et pour rappel, les unités Egyptiennes étaient la coudée (royale) divisée en 7 palmes, chaque palme étant elle-même divisée en 4 doigts ; il y avait donc 28 doigts dans une coudée.



Par rapport à notre système métrique, cela donne :

1 coudée = 0,5236 m soit 52,36 cm

1 palme = 0,0748 m soit 7,48 cm

1 doigt = 0,0187 m soit 1,87 cm

Il apparaît d'ores et déjà que les Egyptiens avaient une précision remarquable dans leurs dimensions et mesures. Avec un tel système, ils pouvaient faire toutes les constructions qu'ils voulaient, leur marge d'erreur étant très faible, de l'ordre du demi-doigt.



Une règle d'une coudée Egyptienne (musée du Louvre)

Actuellement, l'erreur de tout le monde est de travailler sur les pyramides en appliquant notre système métrique ; là, on fait rentrer des erreurs parce qu'on ne pense pas du tout "Egypte Antique"...

Ensuite, les Egyptiens n'ayant pas de logiciel 3D à leur disposition, il leur fallait quand même imaginer dans l'espace. Une pyramide est avant tout un volume, donc un objet en 3 dimensions, qui peut être comparé à un espace clos dans lequel des pièces vont être construites. Il fallait donc matérialiser cet espace dans au moins 2 dimensions : les Egyptiens travaillaient donc sur 2 plans, un plan horizontal et un plan vertical (appelé aussi plan frontal). Et pour repérer chaque composant dans l'espace, les Egyptiens utilisaient un système de grilles orthogonales carrées basé sur l'unité, une coudée, ou sur un multiple de cette unité en fonction des besoins.

Ainsi, le volume lui-même de la pyramide est conçu sur deux grilles primaires déterminées en multiples de 20 coudées :

- Sur le plan horizontal, une grille de base de 22 fois 20 coudées, soit 440 coudées
- Sur le plan vertical, une grille de base de 14 fois 20 coudées, soit 280 coudées

Ce qui donne un *Seked* de 14/11 (14 étant la hauteur et 11 étant la demi-base à l'apothème, soit  $22/2=11$ )

Pour que le principe fonctionne parfaitement, c'est-à-dire la transmission de ce qui a été conçu en réalité construite, il faut un point de référence immuable : celui-ci est l'axe vertical matérialisé par la jonction des axes Nord/Sud et Est/Ouest.

La grille primaire sur le plan horizontal est donc centrée sur les axes Nord/Sud et Est/Ouest et c'est pour cela que pour la construction, en dehors de l'aspect religieux de cette orientation, la détermination du Nord est fondamentale dans la conception car c'est la méthode la plus simple et la plus précise pour déterminer un axe de base sur le chantier. Le système de référencement devient donc, pour le volume, quelques lignes faciles à transcrire pour la construction

Une fois l'axe Nord/Sud déterminé, par astronomie et confirmé par ombre solaire, l'axe Est/Ouest est facilement déterminable par arc de cercles successifs. Les 4 bases des faces sont tracées :

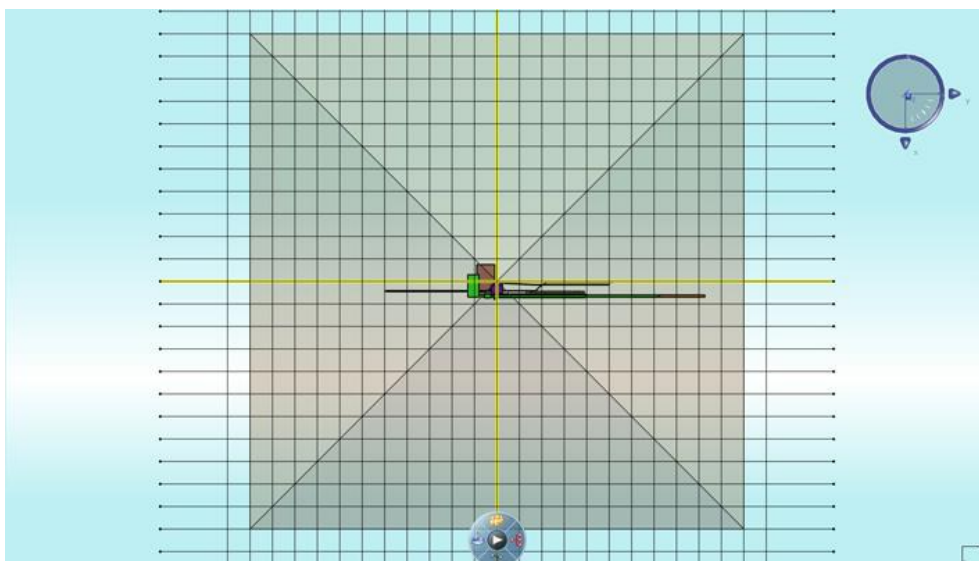
Base de la face Est à 220 coudées (22 fois 20c) à l'Est de l'axe Nord/Sud

Base de la face Ouest à 220 coudées (22 fois 20c) à l'Ouest de l'axe Nord/Sud

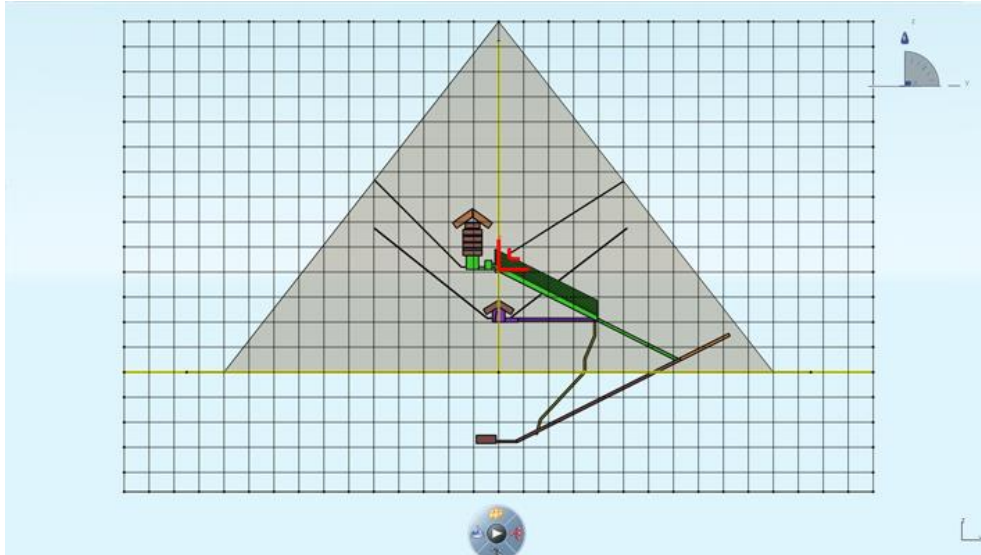
Base de la face Nord à 220 coudées (22 fois 20c) au Nord de l'axe Est/Ouest

Base de la face Sud à 220 coudées au Sud de l'axe Est/Ouest

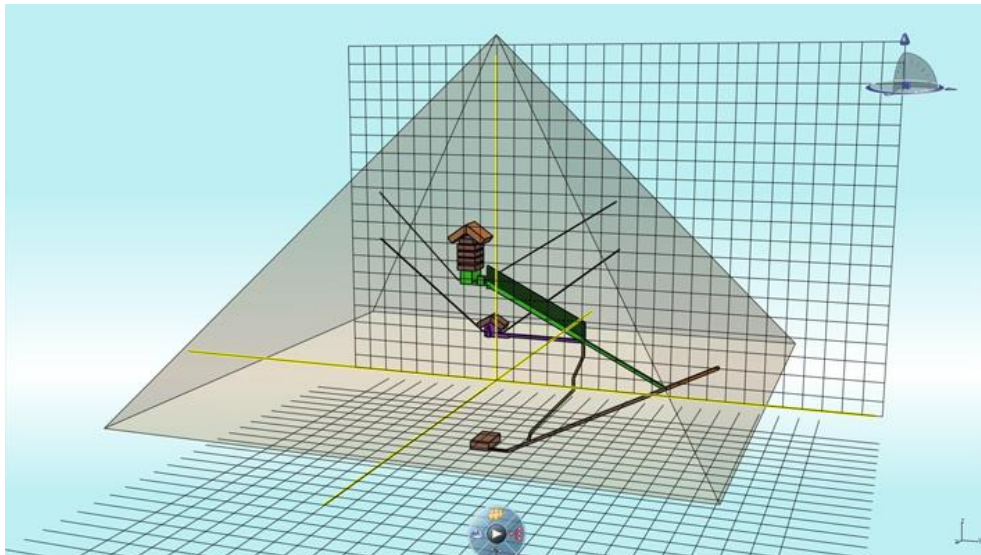
En partant des axes au lieu d'une face, la marge d'erreur est déjà divisée par 2. Quant aux angles, ils sont ainsi déterminés par les sections des lignes de base et peuvent être contrôlés et précisés à partir des diagonales.



La grille primaire horizontale de 20c x 20c est centrée sur les axes N/S et E/O matérialisés en jaune



La grille primaire verticale de 20c x 20c est centrée sur l'axe vertical matérialisé en jaune



La conjonction des 2 plans donne le volume

Quant aux ouvrages intérieurs, ils sont conçus et transcrits à partir d'une grille secondaire d'une coudée carrée tracée à l'intérieur de la grille primaire mais uniquement dans la zone où les ouvrages seront construits : une bande centrée sur l'axe Nord/Sud d'une largeur d'environ 40 coudées, les ouvrages étant désaxés vers l'Est dans cette bande.

Tous les ouvrages construits dans la pyramide de Kheops se trouvent dans cette bande. La précision des ouvrages (par rapport à l'axe Nord/Sud en particulier) résulte du fait que sur le chantier, tous ces ouvrages sont à proximité immédiate de cet axe Nord/Sud, donc la marge d'erreur par rapport à cet axe est très faible ; on constate d'ailleurs sur place que c'est dans cette zone, Grande Galerie, couloirs ascendant, descendant et horizontal que l'alignement sur l'axe Nord/Sud est le plus précis, et on comprend pourquoi.

Il faut bien comprendre qu'avant de construire la pyramide, les architectes et ingénieurs ont été obligés de la concevoir, faire des plans. Pour aller construire une Chambre du Roi à +43m de hauteur 14 années après le début du chantier à un endroit précis, il faut tout déterminer à l'avance. Qu'est-ce que la Chambre du Roi ? Finalement, c'est un volume en forme de boîte à chaussure (!) de 20 coudées de longueur, 10 coudées de largeur et 11 coudées de hauteur qu'il faut aller positionner

dans l'espace (volume de la pyramide). Grâce au système de grilles, elle est parfaitement positionnable spatialement. En conséquence du choix de mettre un plafond plat à cette chambre, les Egyptiens ont été obligés d'intégrer la Grande Galerie (grue de chantier ou plutôt tirefort) dans le projet. Et c'est celle-ci qui va tout déterminer spatialement dans le volume.

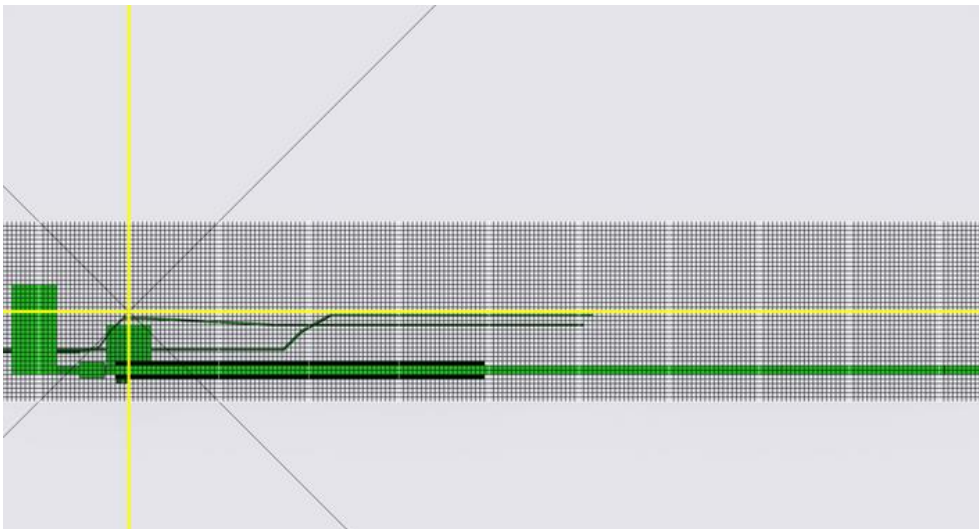
Vers la 4ème/5ème année du chantier, il fallait bien commencer la construction du couloir ascendant. Il fallait donc, sur le plan horizontal, savoir précisément où sur l'assise en construction les ouvriers allaient démarrer ce couloir, soit à 120 coudées au Nord de l'axe Est/Ouest, son axe étant déporté de 13 coudées vers l'Est par rapport à l'axe Nord/Sud. La suite était toute simple puisque les pentes de ce couloir ascendant et de la Grande Galerie sont de 1 pour 2 (soit 50%). Ils montent d'une coudée toutes les 2 coudées !

Dans le plan vertical (frontal), tout est aussi très simple puisque tout est basé sur une grille d'une coudée carrée. On retrouve la Chambre du Roi à 82 coudées de la base, son mur Nord à 13 coudées au Sud de l'axe Est/Ouest, la chambre étant désaxée, son mur Ouest à 6 coudées à l'Ouest de l'axe Nord/Sud et son mur Est à 14 coudées de l'axe Nord/Sud (ce positionnement est déterminé par la position de la Grande Galerie).

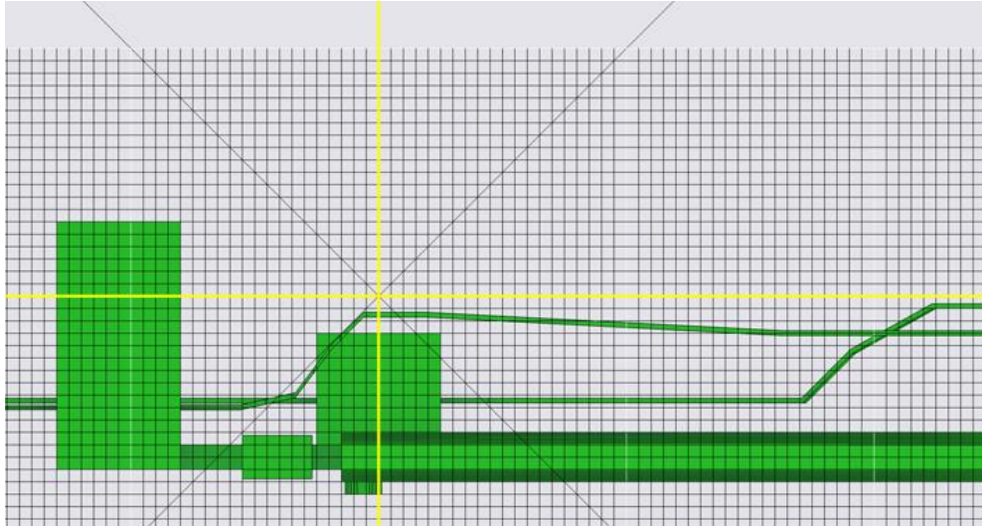
La Grande Galerie fait 82 coudées en projection horizontale (plan horizontal) et a un dénivelé de 41 coudées en plan vertical (1 pour 2). Son mur Sud (haut) est désaxé de 3 coudées vers le Sud par rapport à l'axe Est/Ouest ; ce décalage est motivé pour que la face du "quai haut" soit exactement sur l'axe Est/Ouest ; son axe est désaxé de 13 coudées vers l'Est par rapport à l'axe Nord/Sud.

Le point zéro de toute la conception est situé à ce point précis du quai haut de la Grande Galerie (matérialisé en rouge sur la grille primaire verticale ci-dessus), tous les ouvrages intérieurs ayant été positionnés et tracés en « redescendant » vers la base afin de déterminer le point de démarrage du couloir ascendant pour positionner exactement toutes les chambres.

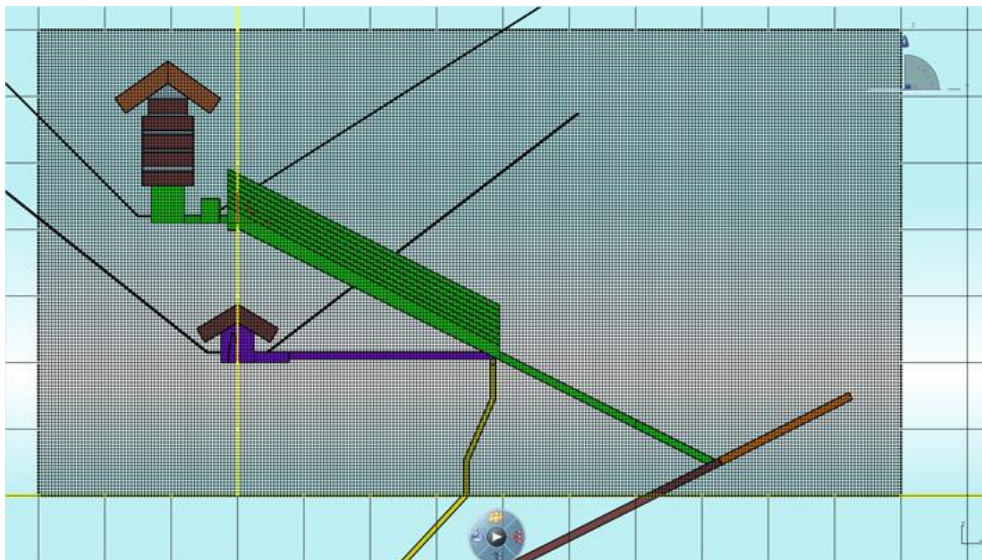
Tout a été conçu selon ce principe et tout à fait vérifiable en conception 3D.



La grille secondaire horizontale de 1c x 1c est centrée sur l'axe N/S



Zoom sur les ouvrages intérieurs décentrés sur la grille secondaire horizontale de 1 x 1c.



La grille secondaire verticale de 1c x 1c

La Chambre de la Reine est centrée sur l'axe Est/Ouest

La face verticale du quai haut de la Grande Galerie est alignée sur l'axe Est/Ouest.

C'est 2 détails ne sont pas dus au hasard mais pour des raisons très précises.

Sans ordinateurs, sans 3D, les Egyptiens savaient concevoir dans l'espace très bien et très simplement : Tout est facile à transcrire de la conception à la réalisation et TOUT EST EN COUDEES ENTIERES, pas de virgules. Pourquoi aller mettre des virgules dans un volume de cette taille ?

En complément de la conception par grille, les Egyptiens maquetteaient les points sensibles : jonctions de couloirs par exemple. C'est pour cela qu'ils ont fait une maquette (creusée dans le sol) à une cinquantaine de mètres à l'Est de la pyramide. Et cette maquette est toujours là, nous donnant de très bonnes indications sur leur façon de travailler.

Voilà un aperçu de ce qui est fondamental dans la pensée Egyptienne de l'époque au niveau de la conception des projets de monuments : simplicité et rationalité.

Jean-Pierre Houdin

Fait à partir de l'étude d'origine de septembre 2007

Dessins 3D réalisés avec le logiciel CATIA de Dassault Systèmes