

**Sur une méthode d'amenée des blocs nécessaire à la construction d'une pyramide, selon une rampe hélicoïdale en pierre à pente non constante, structure permettant de positionner les blocs au centimètre près et se transformant, après avoir rempli son usage, en revêtement de finition plan.**

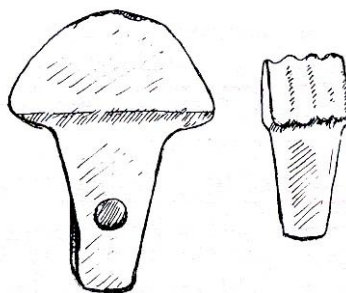
**J.P.Petit<sup>1</sup>**

**Abstract :** L'idée d'utiliser une rampe hélicoïdale pour construire une pyramide n'est pas nouvelle mais, toujours conçue en brique crue, celle-ci soulève de nombreux problèmes. Elle est fragile, surtout vis à vis de très lourdes charges. Elle masque par ailleurs la construction pendant tout son déroulement et rend donc impossible l'alignement direct des blocs par repérage visuel. La rampe proposée s'appuie sur une structure sous-jacente, en marches d'escalier semblable à celle qui a subsisté dans la pyramide de Kheops. Elle monte d'un gradin à chaque quart de tour et nous la concevons d'emblée dans le même matériau que celui des pierres de revêtement, tout simplement parce que cette rampe, après reprise d'une partie des blocs qui la composent deviendra ce revêtement lui-même, établi du haut vers le bas. Le problème de la résistance aux charges élevées se trouve résolu, l'ensemble ne subissant que des contraintes de compression, celui de l'alignement aussi, du fait du caractère récursif de la structure géométrique. La méthode de positionnement, centimétrique, est entièrement décrite. Le modèle implique une rampe étroite. Nous décrivons une machine très simple, basée sur l'objet trouvé par Selim Hassan près de la pyramide de Khent-Kawes, qui permet l'acheminement de blocs de quarante tonnes par une douzaine d'homme empruntant une telle voie de montée.

---

## 1 – LA MACHINE DE KHENT-KAWES

Aux abords de la pyramide de Khent-Kawes, à Gizeh, l'archéologue Selim Hassan a découvert en 1932 [1] un étrange objet en basalte dont la fonction n'a jamais été élucidée à ce jour.



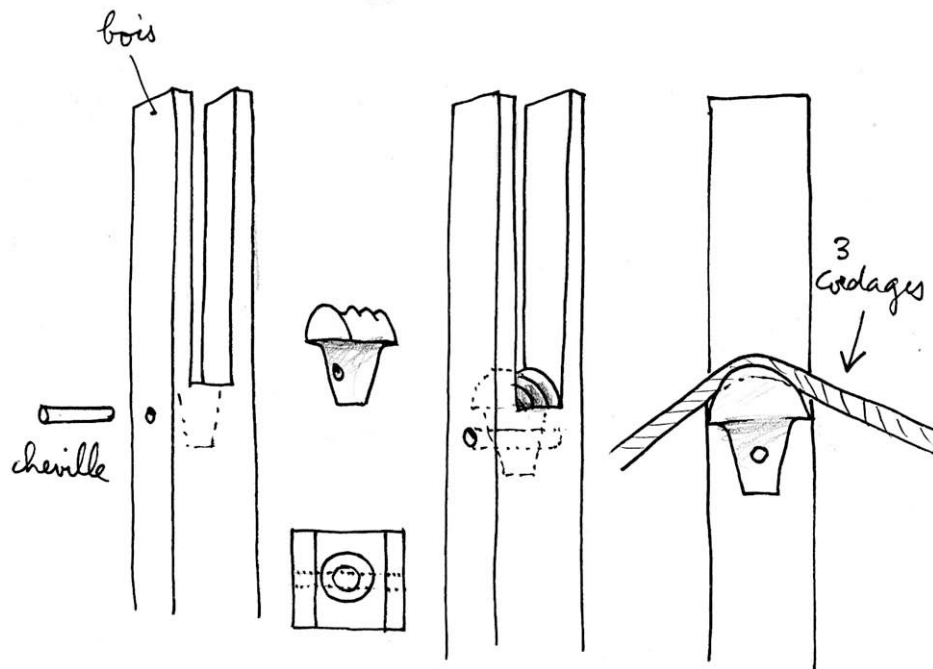
**Figure 1 : L'objet découvert près de la pyramide de Khent-Kawes, à Gizeh**

Celui-ci possède une sorte d'embase tronconique percée d'un trou, ainsi qu'une partie circulaire, flanquée de deux joues en forme de demi-lunes, porteuse de trois gorges destinées à supporter trois cordes. Nous allons intégrer cet objet dans un dispositif qui est la clé du

---

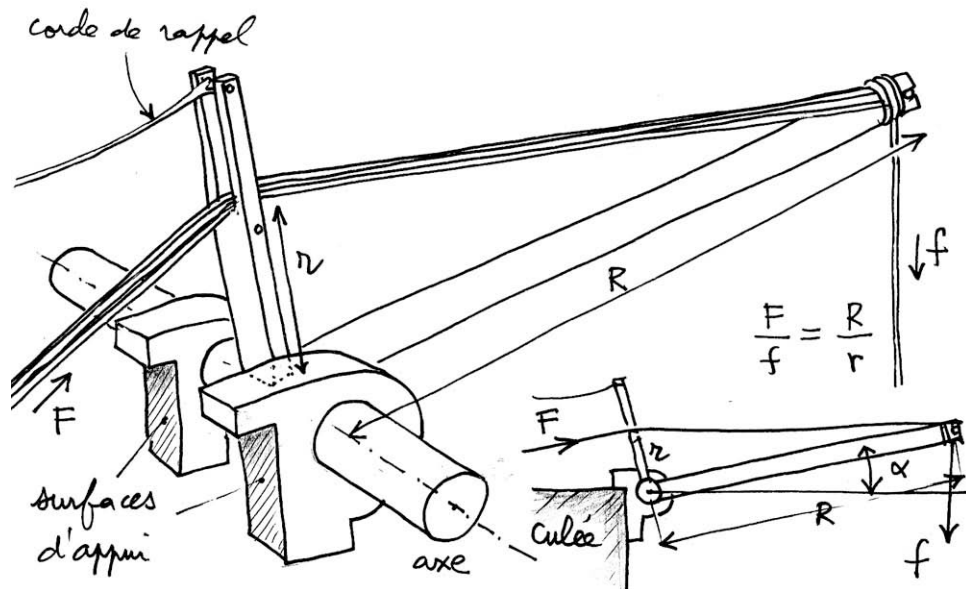
<sup>1</sup> J.P. Levy chez Jacques Legalland, Lou Garagai, 13770, Venelles, France

transport de charges très lourdes dans l'ancienne Egypte, par exemple les mégalithes constituant les éléments du plafond de la chambre sépulcrale de Kheops.



**Figure 2 : Implantation de l'objet de Khent-Kawes**

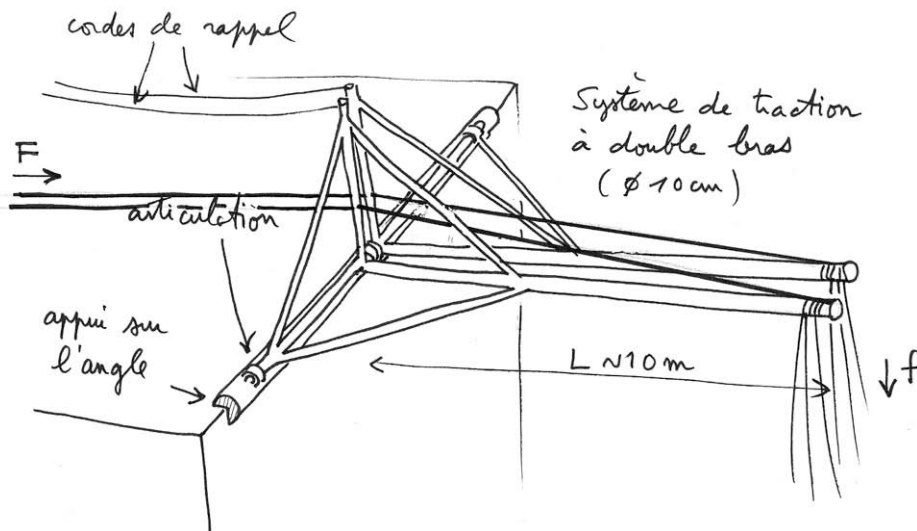
Complétons ce dispositif comme indiqué sur la figure 3. Les cordes ne glissent pas dans ces gorges, la pièce servant simplement à retransmettre les efforts dans le madrier travaillant en compression, dans lequel se loge l'embase tronconique verrouillée par une cheville.



**Figure 3 : Machine de traction**

Le dispositif est composé de deux poutres, de longueurs  $R$  et  $r$ , solidaires d'un axe. Avec les trois cordes fixées à l'extrémité de la plus longue, celles-ci composent un triangle rectangle. Lorsque des ouvriers opèrent une traction correspondant à la force  $f$  ce système transmet par l'intermédiaire des cordes une force  $F$  qui correspond à une multiplication de la force

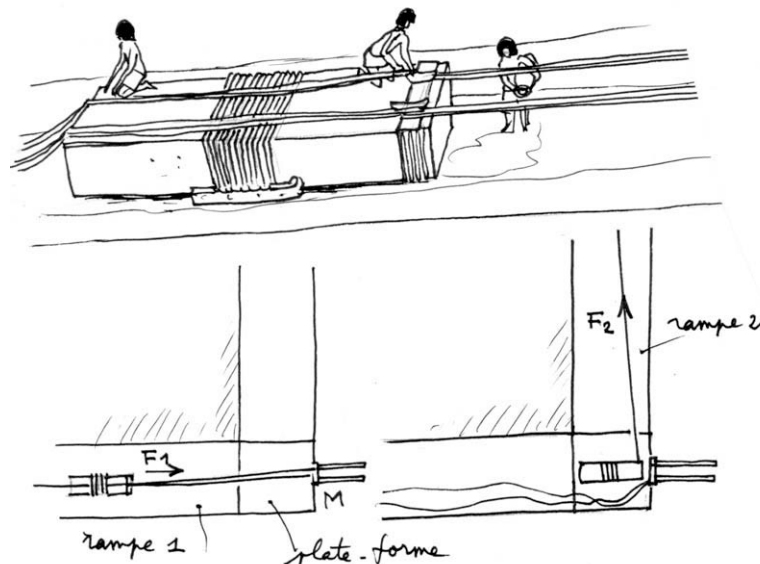
musculaire par le rapport  $R/r$ . Donnons quelques chiffres. En terrain plat un haleur est capable de développer pendant plusieurs heures une force de traction de douze kilos. S'il tire sur une corde il peut développer une force qui peut atteindre son propre poids, en se pendant à celle-ci. Sans aller jusque là évaluons cette force de traction à trente kilos. Ce dispositif peut être installé de différentes manières, selon la façon dont l'axe de rotation est fixé au sol. Dans le cas qui nous intéresse, pour des raisons qui seront développées plus loin, la machine est configurée pour s'adapter sur une culée et fonctionner en traction, mais des engins de chantier plus petits pourraient être arrimés au sol à l'aide de piquets et manœuvrés en pesant sur l'extrémité de la poutre. Considérons les paramètres suivants : Longueur de la poutre longue :  $R = 10$  mètres. Longueur de la poutre courte :  $r = 1$  mètre. Facteur d'amplification : 10. Déplacement de l'extrémité de la poutre longue : 2 mètres (rotation de  $12^\circ$ ). Avec une telle machine un homme tirant sur une corde avec une force de trente kilos, sur une longueur de deux mètres exerce une force horizontale de trois cent kilos, travaillant sur une distance de vingt centimètres. Telle quelle, cette machine semble peu commode dans la mesure où, si elle permet de développer des forces très importantes, elle n'assure le travail de ces mêmes forces que sur des distances relativement faibles. Mais si on couple deux de ces engins, travaillant en alternance, on obtient une machine d'une étonnante efficacité. Voir figure 4.



**Figure 4 : Machine de Khent-Kawes**

Le dessin parle de lui-même. Deux équipes, placées en contre-bas et non représentées, tirant en alternance sur des cordes (force  $f$ ) développent une force  $F$ , transmise horizontalement et alternativement sur les deux jeux de cordes arrimés sur la charge par un système de taquets, voir figure 5. Dans ce qui sera développé par la suite des machines de ce type, installées à chaque virage d'une rampe hélicoïdale à faible pente permettent de haler des mégalithes sur un quart de tour. Commençons par évaluer la force de traction à développer pour permettre à de tels mégalithes de glisser sur un lit d'argile humide (Chevrier [2]). Ce sont les Egyptiens eux-mêmes qui nous apportent la réponse, concernant la friction. Sur un bas relief datant de la XII<sup>e</sup> dynastie (Djehouthotep), reproduit dans [3] page 173 et dans [4], on voit 172 hommes tirer sur un terrain plat une statue dont le poids est évalué à 60 tonnes, ce qui donne 2,86 hommes par tonne. En dehors des mégalithes, qui représentent des charges exceptionnelles, la masse du « bloc standard » de la pyramide de Kheops est évaluée à 2,5 tonnes, chiffre porté à 3 tonnes par Georges Goyon [3] en tenant compte du poids du traîneau et des accessoires, charge qu'une équipe de 8,6 hommes peut haler en continu en terrain plat. Sans le recours à des machines il faudrait prévoir des équipes de 120 haleurs pour tirer les blocs de 42 tonnes,

sans déclivité, sans tenir compte de la composante  $P \sin \alpha$  du poids  $P$ ,  $\alpha$  étant l'angle de montée d'un segment de rampe donné. Chaque haleur étant capable de développer une force de douze kilos pendant une longue durée ceci représente une force de 1,4 tonne. Comme nous verrons par la suite la rampe suggérée est à pente croissante, celle-ci ne devenant importante que tout près du sommet. Jusqu'à une altitude de 70 mètres elle reste inférieure à un pour cent (voir, plus loin, le graphique de la figure 11). En ajoutant la composante horizontale du poids la force à déployer monte à 1800 kilos, ce qui nécessiterait cent cinquante haleurs. Mais le même travail peut être assuré par des machines de Khent-Kawes manœuvrées par un nombre d'hommes dix fois à quinze fois plus faible. S'agissant des « blocs standards », fixés sur leurs chariots dès leur extraction de la carrière, ceux-ci pourront être hissés sur la rampe en continu par dix hommes, la force totale étant de cent kilos pour la friction, plus trente pour la composante horizontale du poids. Ce système permet l'usage d'une rampe étroite, clé de la méthode qui va être développée dans ce qui suit, sur laquelle des équipes réduites de haleurs pourraient prendre place sur celle-ci pour monter des blocs de 2,5 tonnes. Il serait par contre exclu d'y faire se déployer 150 hommes halant des mégalithes de quarante tonnes. Ceci n'est alors possible que grâce à la machine que nous venons de décrire.



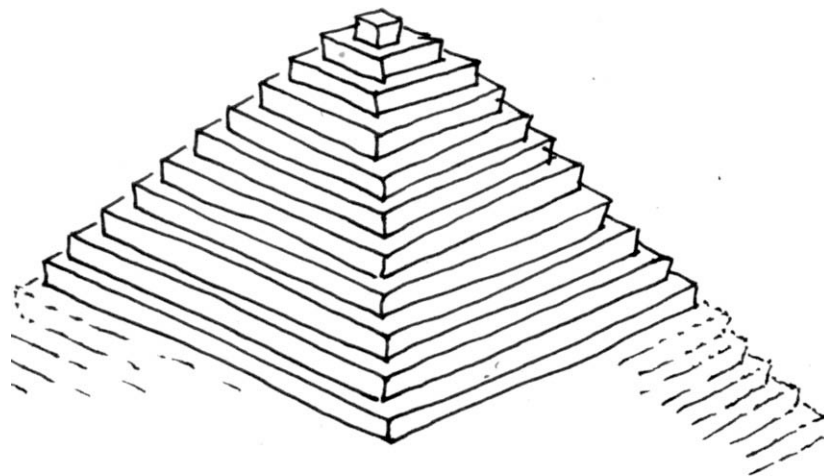
**Figure 5 : Arrimage et manœuvre d'un mégalithe.**

Chaque élément de rampe est relié au suivant par une plate-forme carrée horizontale sur laquelle une machine  $M$  amène le mégalithe. La charge ne risquant plus de glisser, celle-ci est détachée de cette machine  $M$  et couplée à la machine suivante  $M'$  qui assure sa rotation de  $90^\circ$  par ripage, puis son halage sur le segment de rampe suivant. Ces machines (soixante en tout) peuvent ainsi assurer un relais et monter ces charges à 70 mètres de hauteur avec des temps morts minimaux. Le long des segments de rampe les mégalithes sont halés à une vitesse quasi-constante que l'on peut chiffrer à un mètre-minute. Un contremaître règle les opérations. Juché sur le mégalithe, un ouvrier, pendant qu'un des jeux de corde travaille, avale le mou et ré-arrime le second jeu sur les taquets correspondants. Un autre, à l'arrière, s'assure que les cordes ne s'emmêlent pas tandis qu'un troisième veille à humecter l'argile du chemin de glissement. Si on y regarde de plus près cette machine, sous ses multiples variantes se présente comme une concurrente du moufle.

## 2 – CONSTRUCTION D'UNE PYRAMIDE A L'AIDE D'UNE RAMPE HELICOIDALE.

L'idée d'une rampe hélicoïdale n'est pas nouvelle. Georges Goyon [3] opte par exemple pour une rampe en brique crue, à pente constante, enveloppant l'ensemble de la pyramide, revêtement compris. Il imagine que cette rampe pourrait s'accrocher sur les bossages des pierres du revêtement et sur des pierres faisant saillie. Soumise à de fortes charges, pesant jusqu'à quarante tonnes la rampe subit sur sa surface de contact avec les reliefs du futur revêtement une contrainte à forte composante tangentielle et on imagine mal, dans ces conditions, qu'elle puisse se maintenir en place. Goyon se heurte par ailleurs au problème du repérage 3d, le bâtiment étant, jusqu'au déshabillage final, masqué par sa rampe-échafaudage.

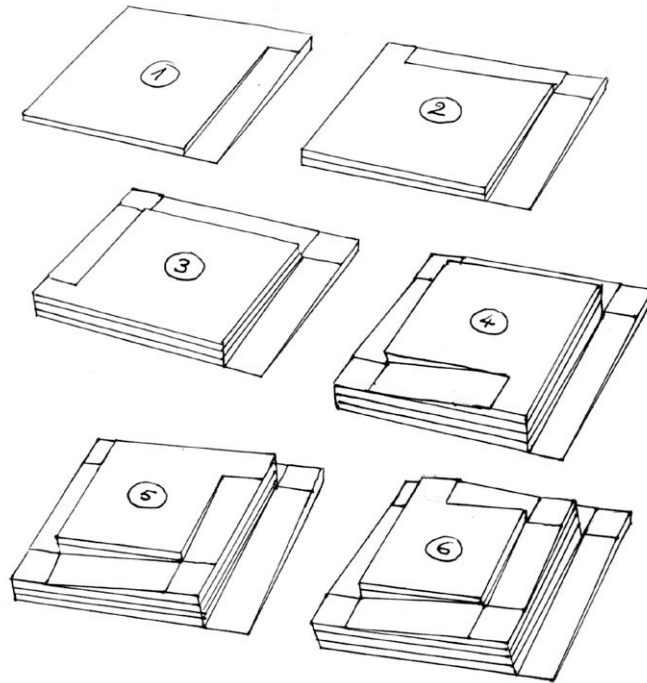
Nous allons proposer ici une solution radicalement différente, fondée sur une rampe en pierre, intégrée à l'édifice en fin de travaux. Les gradins des pyramides ne sont pas tous de hauteur égale. Il peut y avoir différentes raisons à cela, l'une d'elle étant liée aux conditions d'extraction dans les carrières à ciel ouvert. Les carriers profitent alors de la non-homogénéité du filon, qui se présente selon des strates. Goyon explique très bien, dans ses écrits ([3] et [5]), comment cette extraction s'opère, les carriers ménageant des tranchées à l'aide d'outils en pierre dure. Dans ces conditions l'épaisseur du filon détermine l'épaisseur des blocs. Ceci expliquerait pourquoi on trouve, par exemple sur la pyramide de Kheops, une succession de couches de pierres de hauteurs différentes, qui correspondrait alors à des épaisseurs différentes de strates successives.



**Figure 6 : La structure « sous-jacente », de base (celle qui a subsisté).**

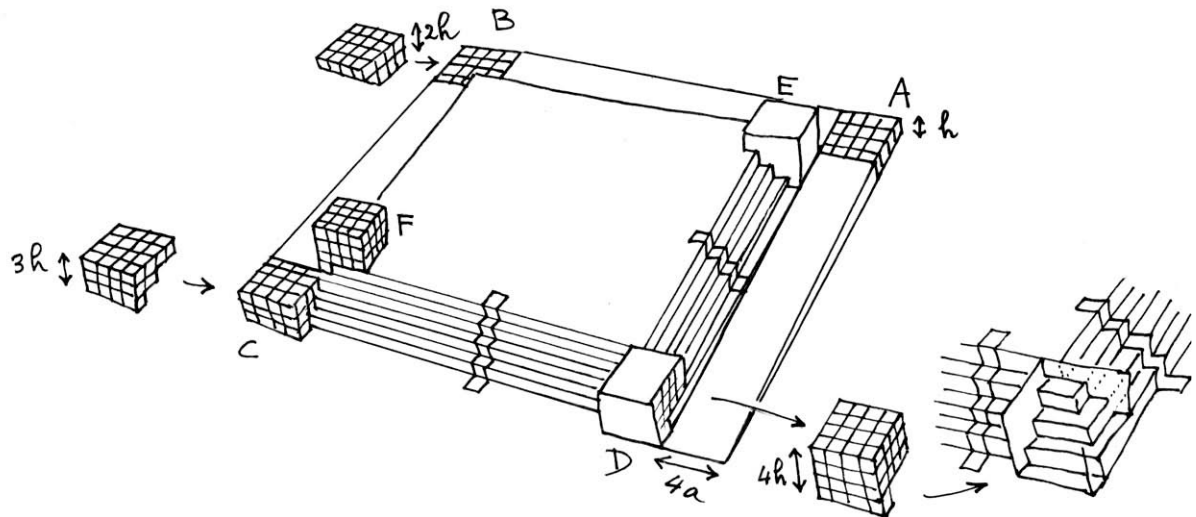
Dans ce qui suit nous allons opter pour une « pyramide schématique » où ces gradins seraient tous de même hauteur  $h$  mais, fondamentalement, le fait que ceux-ci aient des hauteurs variables ne poserait pas de problème insoluble. Comme G.Goyon [3] et antérieurement Badwy [6] et Maragioglio-Rinaldi ([7] et [8]) on envisagera que la pyramide soit construite par strates successives, avec tous ses éléments, couloirs d'accès avec leurs plafonds renforcés, chambres sépulcrales, etc. Tout part d'un dessin au sol et d'un pointage précis de la base de l'axe de symétrie. La pyramide de Kheops comporte 128 « gradins ». Nous appellerons  $a$  la largeur du gradin. Le rapport  $a/h$  dépend de l'angle de la pyramide. La figure 7 montre de manière très schématique la construction de la pyramide, strates par

strates, avec le développement de sa rampe en pierre. Chaque niveau supplémentaire croît de la hauteur  $h$  d'un « gradin », à chaque quart de tour. Les dessins ne sont évidemment pas à l'échelle, la rampe étant beaucoup plus étroite (sa largeur vaut  $4a$  ).



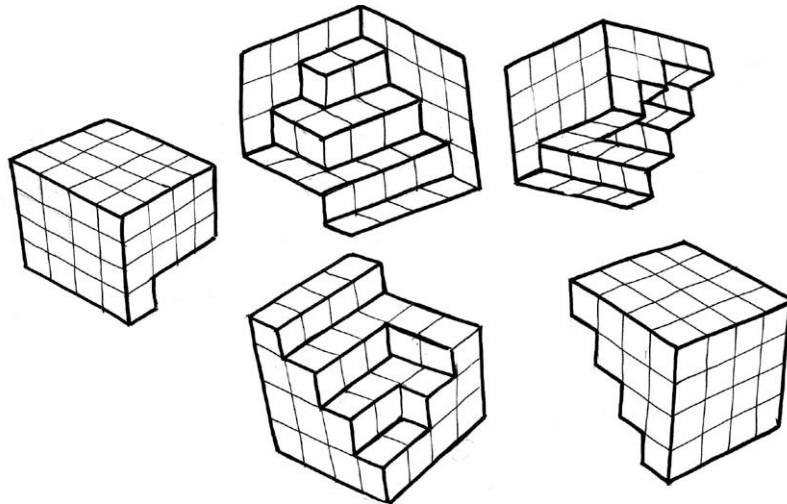
**Figure 7 : Construction de l'ensemble structure interne plus rampe en pierre, par niveaux successifs. On monte de la hauteur  $h$  d'un « gradin » à chaque quart de tour.**

Sur ces dessins on voit parfaitement que la rampe est constituée par une succession de plans inclinés, raccordés par des plate-formes carrées, de côté  $4a$  situées aux angles, là où la rampe effectue un virage à  $90^\circ$ . Sur la figure 8 on voit se constituer, progressivement, ce que nous appellerons un « ensemble angulaire », objet qui s'inscrit dans un parallélépipède de base carrée de côté  $4a$  et de hauteur  $4h$ . L'objet est totalement constitué en D et sa hauteur vaut alors  $4h$ . Les objets C, B, A représentent le même objet où on a enlevé, en bas des épaisseurs qui sont successivement égales à  $h$ ,  $2h$ ,  $3h$ . L'objet A est ainsi d'épaisseur  $h$ , l'objet B d'épaisseur  $2h$  et l'objet C d'épaisseur  $3h$ . Les rampes menant aux plate-formes A, B et C ont été représentées, mais non celles joignant les ensembles C et D, puis D et E où on a laissée apparente la « structure sous-jacente ». Cet assemblage, en dépit des efforts que l'on peut déployer pour le dessiner reste assez difficile à appréhender, à moins d'en construire soi-même une maquette en carton, ce qui est relativement facile.



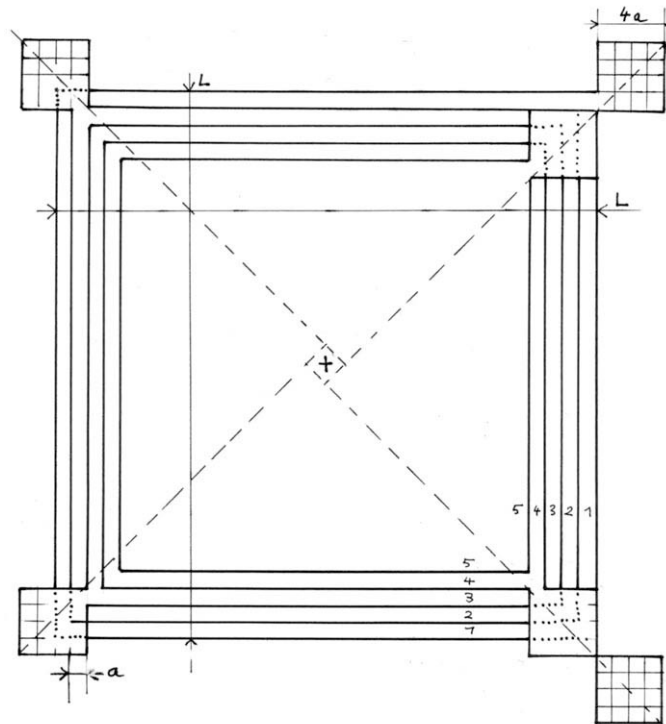
**Figure 8 : Démarrage de la pyramide (schématique).**

La rampe s'enroule ainsi autour de la « structure sous-jacente » en enchaînant une succession d'ensembles angulaires, présents à chaque virage à 90°. Dans la figure 9 nous avons représenté ces « ensembles angulaires » sous différents angles.



**Figure 9 : « Ensemble angulaire »**

Les lignes qui y figurent ne font que représenter leur « métré », l'unité de mesure pour les hauteurs étant  $h$ , et celles pour la largeur et la profondeur  $a$ . La vue de l'extrême gauche et celle située en bas et à droite mettent en évidence la plate-forme carrée de côté égal à  $4a$  sur laquelle les manœuvres de rotation des blocs sur traîneaux sont effectuées, par ripage. Bien que pouvant être qualifiés de « pierre angulaire » ces blocs ne sont évidemment pas des monolithes. Ils sont constitués par des assemblages de blocs parallélépipédiques disposés de manière à assurer la meilleure solidité possible. Nous allons maintenant considérer une vue en plan de ce début de rampe (dont un rappelle qu'il n'est évidemment pas à l'échelle).



**Figure 10 : Plan schématique mettant en évidence l'agencement des plate-formes horizontale.**

Les techniques de traçage au sol ont été étudiées par Engelbach [8]. Le carré de côté  $L$  représente le premier gradin de la structure sous-jacente, celle qui subsiste après « déshabillage » de la pyramide. On remarquera que les lignes joignant les sommets de ces carrés indiquant les positions des « ensembles angulaires » ne convergent pas au centre géométrique de la pyramide, marqué par une croix. C'est une donnée dont il faudra tenir compte quand on définira les opérations de visée qui permettront de positionner les blocs selon des méthodes qui seront précisées à la section 3. Comme il s'agit d'une vue en plan les quadrillages correspondent à l'unité  $a$ , largeur du gradin-type. La distance minimale qui sépare les droites joignant les sommets extérieurs des « ensembles angulaires » est égale à la moitié de la diagonale d'un carré ayant pour longueur  $a$ .

Une méthode de construction d'une pyramide n'a d'intérêt que si l'ingénieur supervisant les travaux est en mesure de fournir à ses contremaîtres, à tout instant, des indications de positionnement des pierres avec une précision centimétrique. Modulo le changement d'échelle c'est que nous serions, avec cette méthode, à même de faire. Un plan trois-vues de la pyramide ne serait lisible qu'à une échelle suffisante. En tant qu'ingénieur je dirais que pour conduire de tels travaux il faudrait disposer de documents mesurant 2 m sur 2m. Les plans fournis ici resteront donc nécessairement schématiques, quoique fournissant les indications de principe exempts de la moindre ambiguïté.

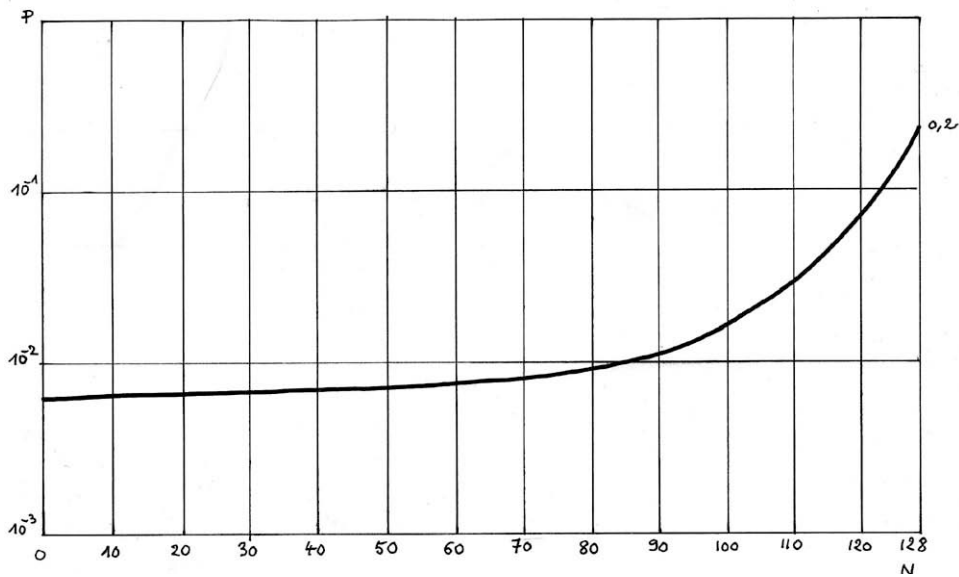
Cette rampe, appliquée à la construction de la pyramide de Kheops comporterait une trentaine de tours. Le parcours à effectuer pour atteindre son sommet serait de treize kilomètres, contre 2,65 km pour la rampe en brique crue suggérée par Goyon [3]. Les blocs cyclopéens devront parcourir environ dix mille mètres avant d'atteindre la mi-hauteur de la pyramide (une quinzaine de tours de rampe). Cette distance à parcourir peut paraître importante mais il y a plusieurs contreparties. La pente est faible et dans ce type de rampe il n'y a que des efforts de compression. Les éléments de la rampe et les ensembles angulaires reposent directement sur les gradins de la structure interne et ne risquent ainsi pas de



s'effondrer, ce qui n'est pas le cas pour la rampe hélicoïdale de brique crue de Goyon [3] qui est accrochée sur les bossages du revêtement. Notre rampe de pierre est à pente croissante. L'examen du plan de la figure 9 permet de déterminer la loi de variation de la pente en fonction de l'indice  $n$  du segment considéré, l'indice 1 correspondant au premier plan incliné.

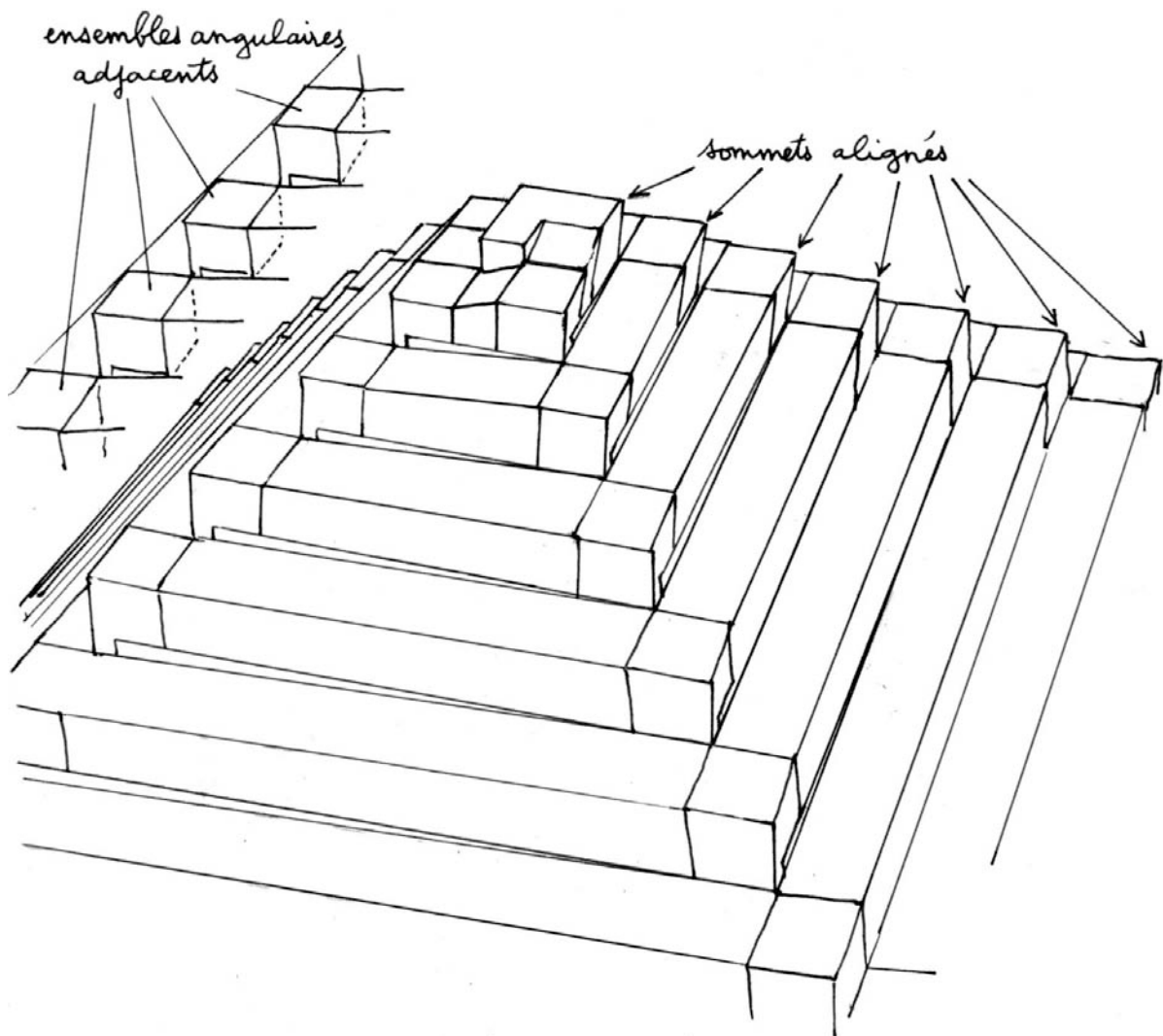
La première rampe est de longueur  $L$ , la seconde de longueur  $L - 2 a$  et la  $n^{\text{ième}}$  de longueur

$$L - 2 a (n - 1)$$



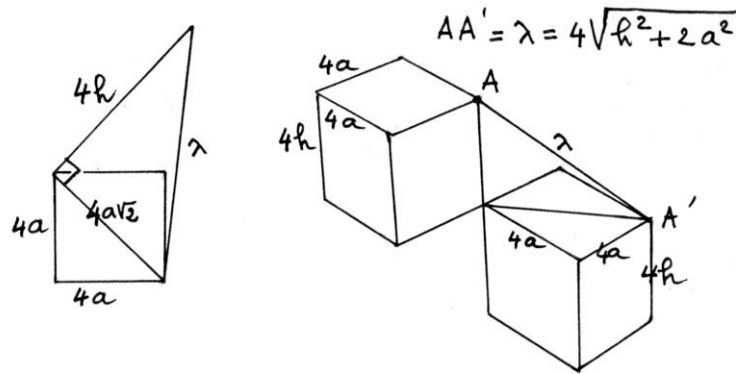
**Figure 11 : Evolution de la pente de la rampe.**

On voit qu'à mi-hauteur la pente reste bien inférieure à un pour cent. A la hauteur du  $110^\circ$  gradin, à 85 % de la hauteur cette pente atteint seulement trois pour cent. La rampe ne se redresse qu'au voisinage immédiat de la partie sommitale où on pourra envisager une autre technique que le simple halage, sur une distance qui n'excède alors pas quelques dizaines de mètres. Notons que la pente du premier plan incliné est de  $1,15/223 = 0,005$ . Les ensembles angulaires successifs se déduisent par la combinaison de trois opérations. Il y a d'abord une translation verticale de  $4 h$ , puis une rotation de  $90^\circ$ , enfin une translation le long de ce  $n^{\text{ième}}$  segment de  $[ L - 2 a ( n - 3 ) ]$ . Comme on peut le voir sur la figure 8 des ensembles angulaires dit « adjacents » ont un sommet commun. Ils se déduisent les uns les autres par une translation de longueur  $\lambda$  le long d'une direction parallèle à l'arête considérée.



**Figure 12 (à modifier en montrant les décrochements des ensembles angulaires) :  
L'ensemble structure interne plus rampe, achevé.**

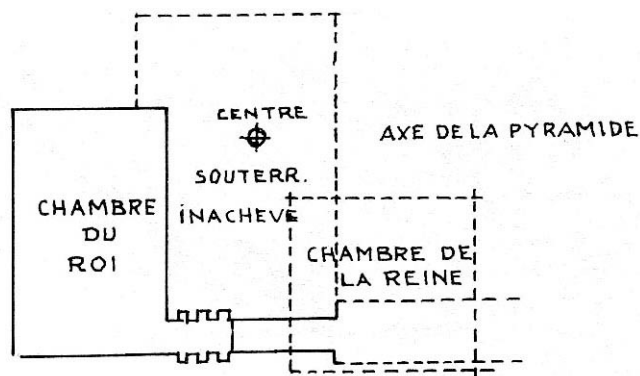
On détermine sans difficulté la longueur de ce vecteur-translation à l'aide d'une opération appelée rabattement (à gauche de la figure. Celle de droite représente une vue en perspective de deux blocs adjacents).



**Figure 13 : Construction de la longueur  $\lambda$  séparant deux sommets extérieurs d'ensembles angulaires adjacents. La figure dans l'espace est à droite.**

### 3 – REPERAGE CENTIMETRIQUE DES ELEMENTS DE LA RAMPE.

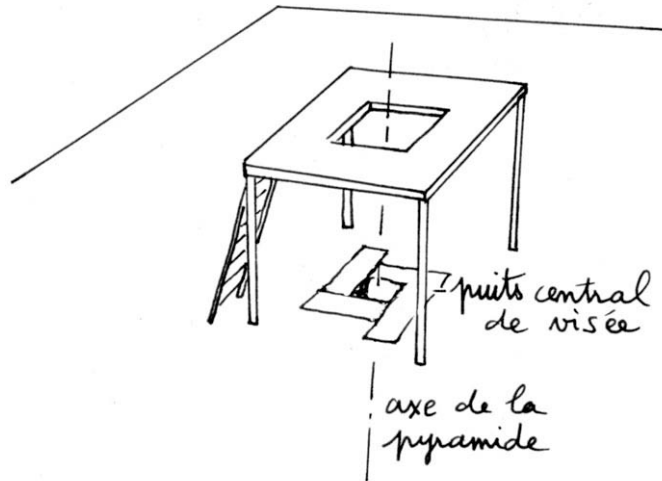
Comme le remarque Georges Goyon [3] ces repérages sont difficilement envisageables avec une telle précision si on a pas accès tout au long de l'érection de la pyramide à la connaissance de son axe, matérialisé par un fil à plomb pointé en permanence vers une marque au sol. Ceci implique, comme il le note ([3] page 184) de conserver ouvert un puits pointant vers ce point, ceci cadrant avec le fait que les chambres sépulcrales soient déportées vers le sud. La figure 14 reproduit la figure 67 de son ouvrage.



**Figure 14 : Positions respectives des chambres sépulcrales et de l'axe de la pyramide.**

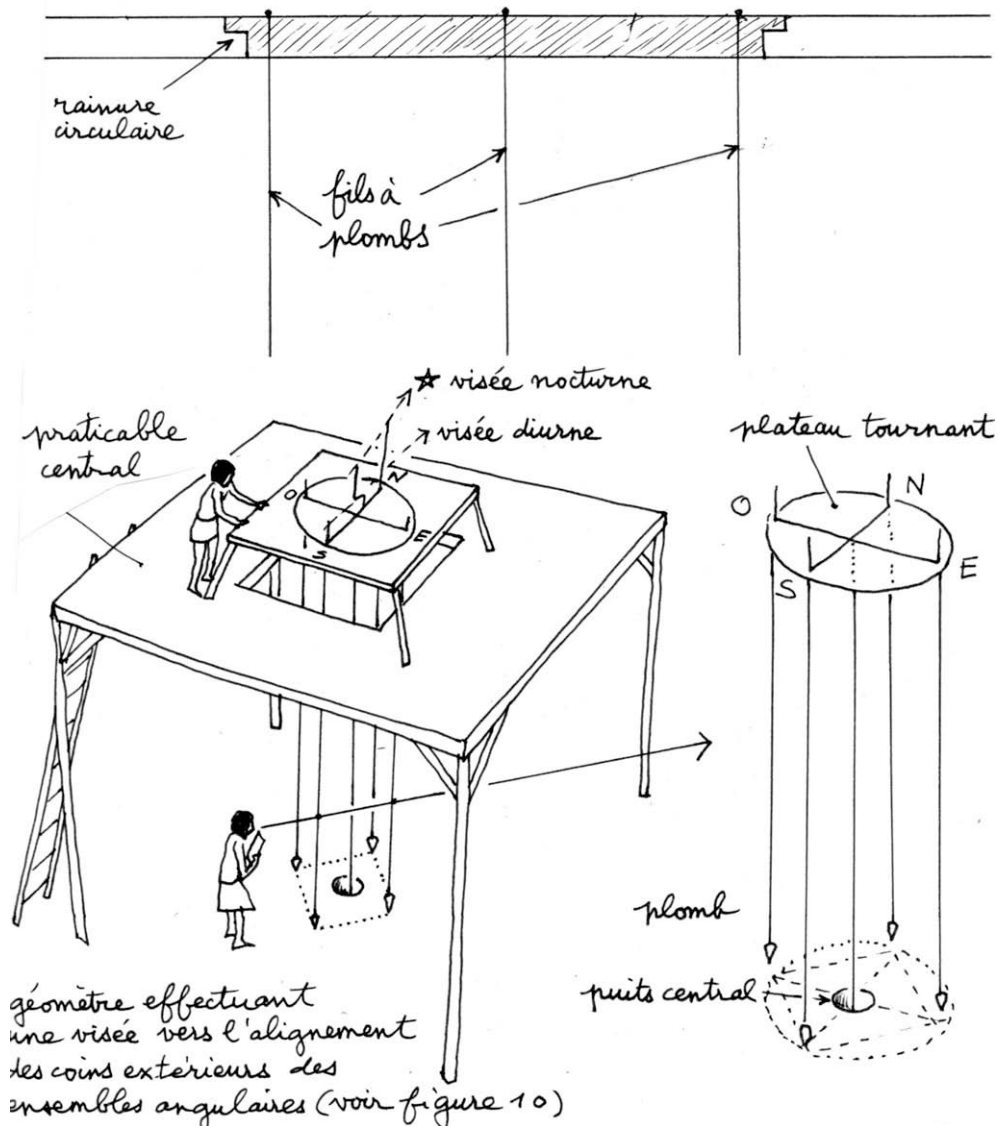
Pour qu'un fil à plomb pointe en permanence sur le repère au sol (ou effectué sur la table rocheuse sculptée, initialement présente sur le plateau de Gizeh) il faut qu'un homme effectue sur place ce contrôle. Il y a alors deux solutions. Où celui-ci est descendu par le puits, ce qui pose un problème de ventilation, où l'homme a accès à ce lieu de travail par une étroite galerie horizontale, cheminant au ras du sol, constituée dès les premiers travaux. Même si la seule chose qu'on demande à cette galerie est de permettre à un homme de s'y glisser son plafond devra être très solide, soit constitué par des encorbellements (comme la Grande Galerie) soit munie de vousoirs. Celle-ci sera en effet située à un niveau où elle devra encaisser tout le poids de la pyramide et où la pression sur son plafond sera maximale. La seconde formule résout le problème de la ventilation. Des repérages effectués en utilisant deux praticables, l'un disposé au centre de l'esplanade de travail et l'autre au voisinage de l'ensemble angulaire à constituer permettront de déterminer la position dans l'espace du coin extérieur avec une précision centimétrique. Détaillons la méthode à utiliser. On positionne à

l'aplomb du puits dans lequel s'enfonce le fil à plomb matérialisant l'axe de la pyramide un premier praticable sous lequel des hommes peuvent évoluer et en haut duquel un autre homme peut accéder à l'aide d'une échelle.



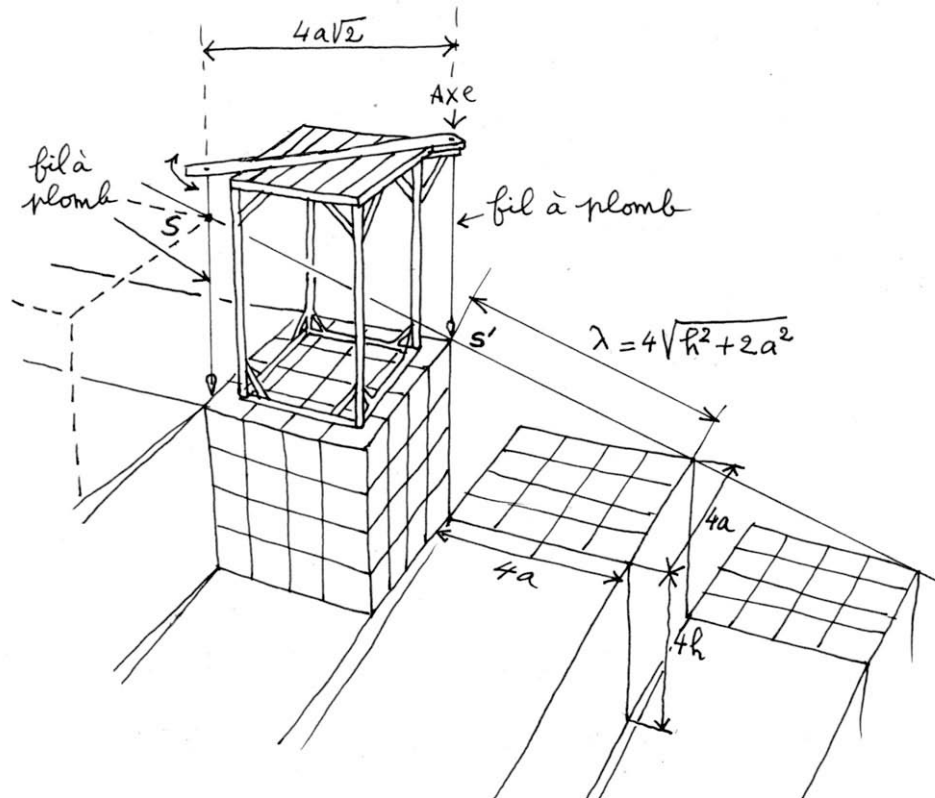
**Figure 15 : Praticable central.**

---



**Figure 16 : La table de visée disposée sur le plancher du praticable.**

L'usage d'une telle table de visée a déjà été évoquée par G.Goyon dans son livre, [3] page 185, figure 68. On s'assure de son horizontalité à l'aide d'un niveau. Les géomètres déplacent alors la table jusqu'à ce qu'un fil à plomb partant de son centre pointe, au fond du puits, sur la marque au sol, ce qu'annonce à la voix l'homme qui est sur place. Cette méthode. La table de visée comporte une partie rotative couissant dans une rainure circulaire (travail que les Egyptiens, experts en ébénisterie ont su réaliser sans peine). Différentes visées peuvent être opérées, comme suggéré par Strabon [9], Moret et Maspéro [10]. Goyon ([11], [12]) pense que le site de Kersakôre pourrait être en fait un point géodésique distant servant au repérage, muni d'un obélisque surmonté d'un miroir convexe donnant à une telle distance une image quasi-ponctuelle du soleil, ce qui faciliterait le repérage. On peut également opérer en effectuant une visée nocturne vers la région polaire ou, également de nuit, en visant une torche allumée à distance. Sous la « table de pointage » pendent quatre fils à plombs dont les points d'attache s'identifient avec la partie centrale de la figure 11. Le cercle ayant un rayon  $a$  (de l'ordre du mètre) les fils, partant de ce cercle sont sur les positions Nord, Sud, Est, Ouest. Les plans passant par les fils (Nord et Est), (Sud et Est), (Sud et Ouest) contiennent tous les sommets des angles extérieurs de « ensembles angulaires de la rampe ». Pour réaliser le positionnement précis de ces points dans l'espace il faut disposer à cet endroit un second praticable.

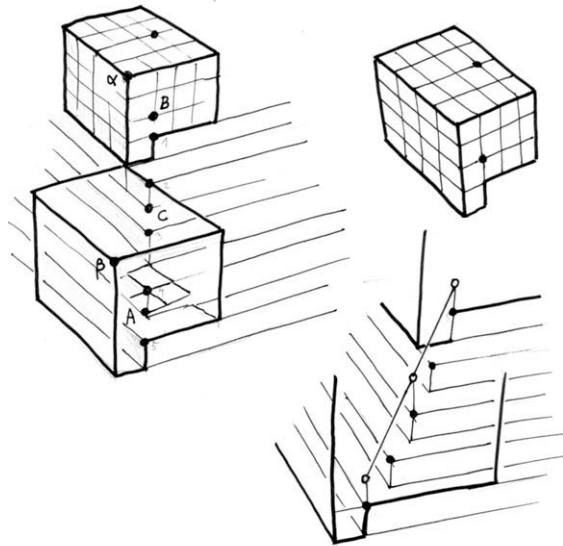


**Figure 17 : Praticable d'angle**

Celui-ci est posé sur un « ensemble angulaire ». La hauteur de ce praticable est supérieure à  $4h$ , qui sera celle de l'ensemble angulaire dont il faut repérer le sommet avec précision. En haut du praticable se trouve un bois qui peut tourner autour d'un axe. Un premier fil à plomb permet d'amener cet axe exactement à l'aplomb du sommet extérieur de l'ensemble angulaire sur lequel repose notre praticable. Un second fil à plomb pend de l'extrémité de la perche à une distance égale à la diagonale d'un carré de côté  $4a$ . Lorsque la perche en bois tourne autour de son axe ce second fil à plomb décrit un cylindre d'axe vertical dont il matérialise la génératrice. Lorsque celle-ci s'inscrit dans le plan correspondant à la visée centrale décrite précédemment le fil s'identifie alors avec l'arête verticale de l'ensemble angulaire à positionner. Plusieurs repérages et visées additionnels permettent alors de positionner le coin extérieur avec précision. Les coins externes des ensembles angulaires étant situés sur des droites parallèles aux arêtes de la pyramide, ceux-ci doivent s'aligner sur direction de visée formant le même angle avec la verticale (repérée par le fil à plomb). Deux coins d'ensembles angulaires adjacents doivent être séparés par une distance  $\lambda$ , déterminée précédemment. Le recoupement de toutes ces mesures permet de positionner tous les coins externes des ensembles angulaires au centimètre près, tout au long de la construction. L'ouvrage achevé on obtient l'objet de la figure 10. Il reste maintenant à repérer la pyramide elle-même à partir de cet objet « structure interne plus rampe ». La finition de la pyramide ne consiste pas à enlever les blocs de cette « rampe » pour dégager la structure interne, en rajoutant après coup les pierres constituant le revêtement mais à aménager cette rampe de pierre en taillant ses blocs de manière ad hoc pour finaliser le travail.

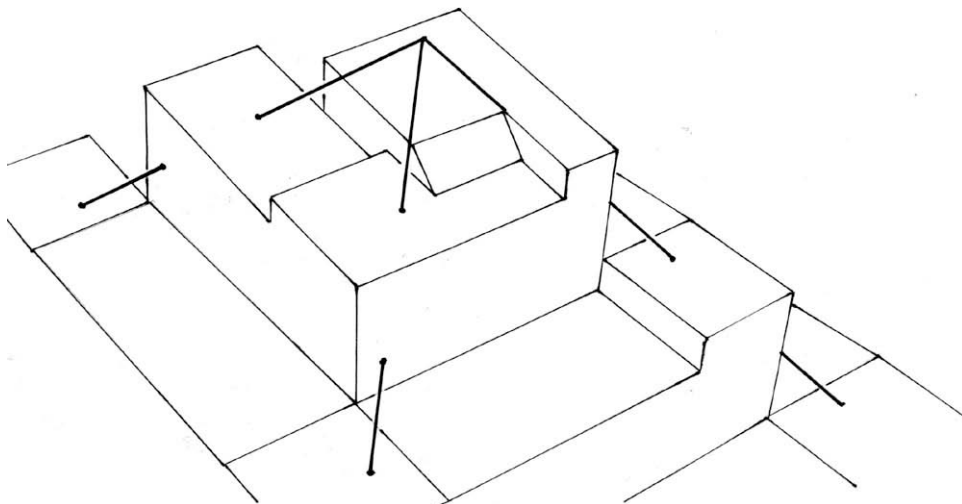
#### 4 – REPERAGE CENTIMETRIQUE DES ARETES DE LA PYRAMIDE

Comment, à partir de cette rampe de pierre dégager « la pyramide qui se trouve à l'intérieur » ?



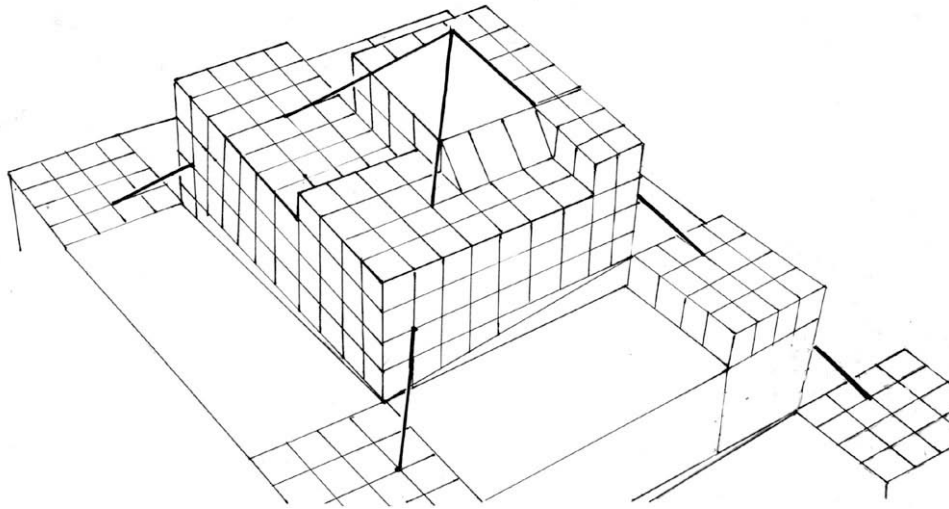
**Figure 18 : Repérage de l'arête de la pyramide au sein des ensembles angulaires.**

Pour constituer les arêtes de la pyramide nous partirons des droites constitués par les sommets extérieurs de la « structure résiduelle » et leur feront effectuer une translation verticale d'une valeur  $+h$ . Ces droites « percent » alors les ensembles angulaires selon deux points, indiqués sur les faces correspondantes sur l'image située en haut et à droite.



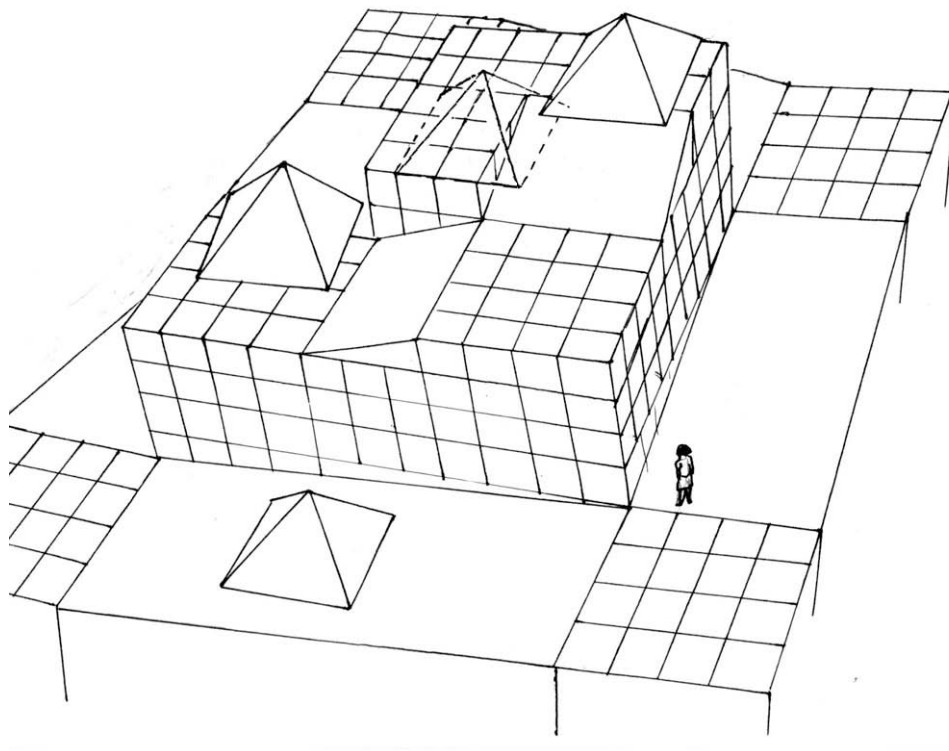
**Figure 19 : Partie sommitale. Repérage des arêtes et positionnement du pyramidion.**

Figure 20 , même image, avec les « mètres » :



**Figure 20 : Partie sommitale avec les mètres. On a volontairement enlevé les cinq derniers plans inclinés permettant la mise en place du pyramidion.**

Sur cette image suivante on a replacé ces rampes, qui montrent comment la pente s'accroît au voisinage immédiat du sommet, avec placement d'un pyramidion dont la base est un carré de côté 3 a. La base de ce monolithe est convexe et viendra se loger dans un réceptacle concave qui assurera son maintien en place en cas de forte secousse sismique.

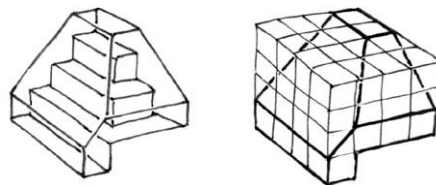


**Figure 21 : Mise en place du pyramidion.**



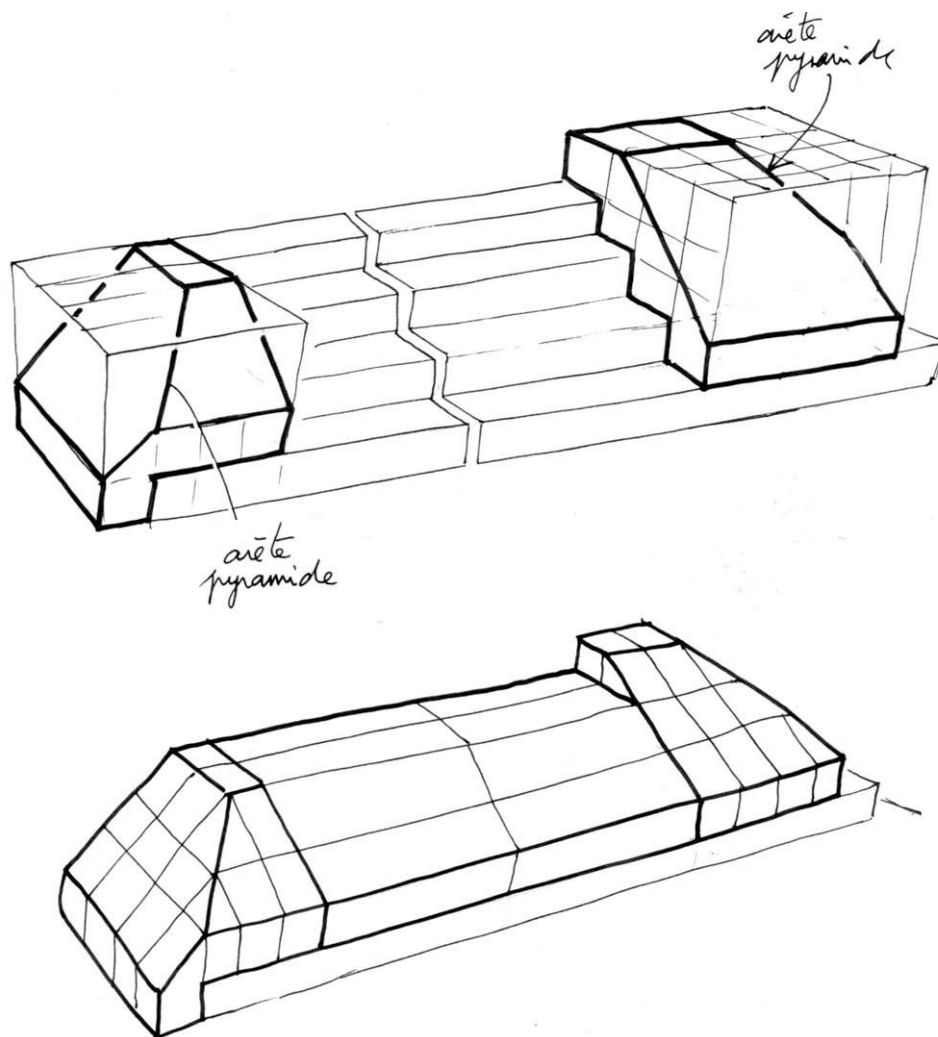
## 5 – FINITION. CONSTITUTION DU REVETEMENT

Le pyramidion ayant trouvé sa place on peut procéder à la taille des blocs de manière à donner à la pyramide sa forme finale, et ce en utilisant le matériau de ce qui avait jusqu'ici servi de rampe. Le sciage pourra être effectué avec une scie à sable, comme suggéré par Emery [13] et par Goyon [5]. Le cuivre étant ductile, des poussières abrasives, de quartz par exemple, s'incorporent alors au métal. Des traces de sciage ont été mises en évidence sur la pyramide de Kheops [5]. Le surfacage sera opéré à l'aide de marteaux de dolérite (Engelbach [14]), technique qui n'est pas sans rappeler le bouchardage de nos modernes carriers. A rappeler : la technique de fragilisation de surface par choc thermique (Goyon [15]). Le dessin ci-après montrent la taille (schématique) qui devra être adoptée pour tous les ensembles angulaires (avec leur métré, qui n'a rien à voir avec la façon dont ils sont physiquement construits).



**Figure 22 : Taille des ensembles angulaires (reprendre et bien indiquer l'arête)**

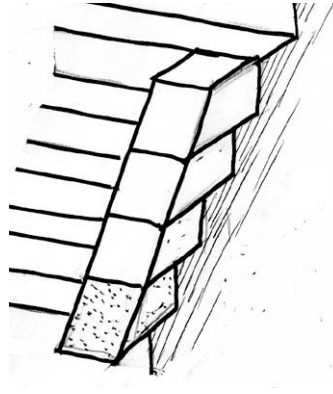
---



**Figure 23 : Taille de deux ensembles angulaires successifs**

Evaluons la quantité de pierre nécessaire pour la finition de la pyramide. En fait c'est la rampe en calcaire qui va elle-même se transformer en revêtement, avec un déchet étonnamment faible. Actuellement, ce qui subsiste de la pyramide de Khéops c'est « tout sauf le précieux matériau du revêtement, en calcaire de Tourah. Comment était-il disposé ? On peut en trouver la trace sur la partie sommitale de la pyramide de Kephren ou, de manière plus accessible sur les vastes portions de revêtement qui ont subsisté sur la pyramide rhomboïdale. Ces éléments de revêtement sont alors disposés comme sur la figure 24, si on excepte bien entendu les parties proches des arêtes, une disposition plus complexe, avec entrecroisement est observée.

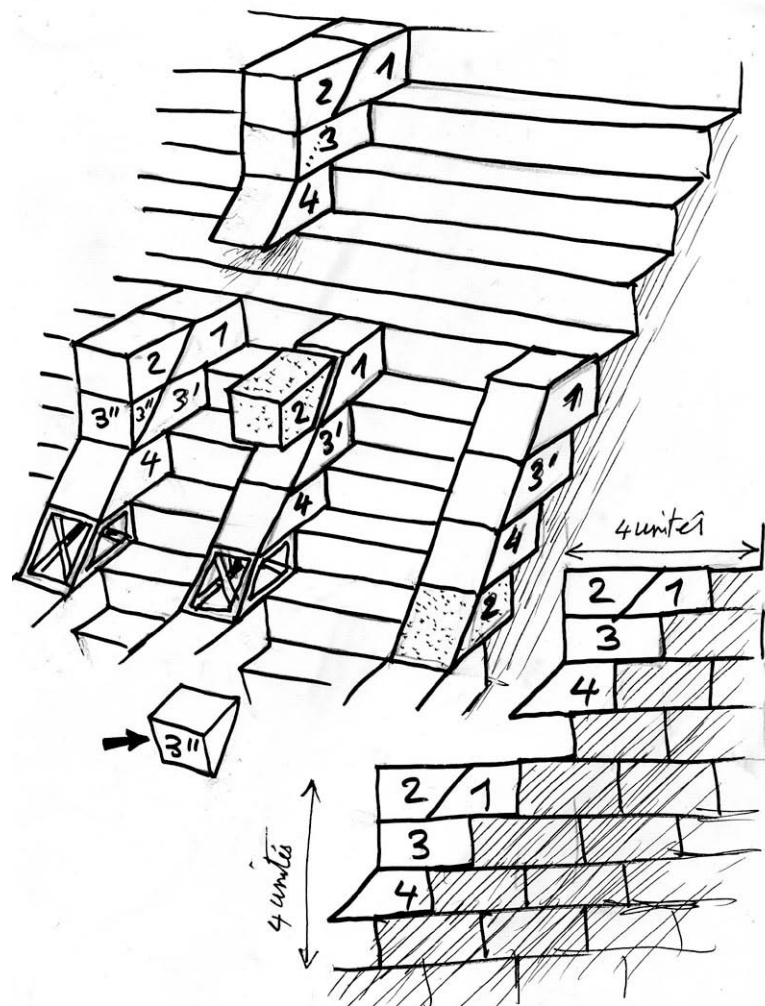
---



**Figure 24 : Disposition des pierres de revêtement sur la pyramide rhomboïdale**

La pyramide est construite en même temps que sa rampe en calcaire , dont ma majeure partie servira, au prix d'une unique découpe oblique effectuée in situ à constituer le revêtement. Dans la figure ci-après on montre comment les éléments en calcaires de Tourha se combine au calcaire nummulitique plus grossier pour constituer la rampe. On laisse subsister une sorte de becquet, qui n'est pas gênant vu que cette rampe est le lieu de deux circulations croisées. Sur sa partie extérieure monteront les traîneaux chargés de blocs. Sur sa partie interne glisseront les traîneaux vides qui pourront alors aisément passer sous ces becquets de pierre.

---



**Figure 26 : Disposition des pierres constituant la rampe. Comment la découpe permet de constituer le revêtement final. Noter en 3'' la pierre triangulaire-reliquat.**

Détaillons les différentes opérations. En bas et à droite, comment son disposé, à chaque étage (les bomides et krossaï d'Hérodote) les pierres de Tourah, en blanc et le calcaire plus grossier (hachuré). On distingue le « becquet ». Sur les figures de gauche on voit comment le sciage in situ de l'élément 3, qui se transforme en un bloc 3' qui reste en place et un bloc 3'' triangulaire, qui constituera un déchet. Le bloc 2, qui aura au préalable été solidement amarré avec des cordes peur alors glisser, d'abord sur deux pierres puis sur un gabarit en bois qui sera par la suite enlevé. Le revêtement en constitué du haut vers le bas. Le bloc 2, (grisé) viendra donc se poser sur l'étage inférieure de la rampe où il pourra être basculé et présente dans le logement où se situait le gabarit en bois, qu'on aura enlevé. Il restait la question de ces blocs triangulaires-reliquats. On en trouve à profusion à proximité des Grandes Pyramides, partout. Comme il sont d'un ré-emploi peu évident, beaucoup n'ont pas été emportés, en débit de leur faible encombrement et poids et on en trouve des quantités sur les différents sites.

Cette description reste schématique. Elle se fonde sur une standardisation complète des blocs. Or on sait que ceux-ci sont de hauteurs variables, par exemple dans la pyramide de Kheops, les plus gros blocs n'étant pas le plus proches du sol. Ce variabilité d'épaisseur vient simplement du fait que ces blocs sont extraits du plateau, constitué de strates de calcaire nummulitique, séparées par des couches moins résistantes. Ceci apparaît très bien dans le corps du Sphinx qui, comme noté par Goyon, serait une « laisse de carrier ». La technique d'extraction a été bien décrite par Goyon. Mais, ce faisant, le maître du chantier n'est pas

maître de l'épaisseur qui est celle du filon. Ces épaisseurs de blocs variables sont simplement dues au fait que les carriers ont exploité des filons d'épaisseurs différentes, les unes après les autres. Le chef de chantier devra donc s'adapter à cette donnée minéralogique et adapter la disposition des blocs de la rampe en conséquence. L'essentiel est que les angles de celle-ci, des coins, soient ajustés avec une précision centimétrique, comme indiqué plus haut, de manière à ce que la conduite de l'élévation de la construction puisse être assurée.

## 6 - CONCLUSION

Bâtir une théorie se référant à la construction des grandes pyramides c'est décrire un ensemble d'opérations qui pourrait permettre, de nos jours, d'édifier ces objets en utilisant la technologie de l'époque. Il semble que nous y soyons ici parvenus. Une critique pourrait être formulée, selon les valeurs du paramètre  $a$  (largeur du gradin) : que ceci conduise à une rampe d'une largeur un peu limitée pour manœuvrer des mégalithes. Réponse : il serait tout à fait possible, dans cette première tranche de travaux de doubler la largeur de la rampe en faisant en sorte qu'on monte de  $2a$  à chaque quart de tour. La largeur de la rampe serait alors  $8a$  au lieu de  $2a$ . Les pentes seraient alors doublées mais on a vu que jusqu'à mi-hauteur elles restaient très faibles. Quand les mégalithes auraient été installés rien n'empêcherait alors les constructeurs de récupérer une partie des pierres de ce début de rampe pour constituer les éléments suivants de la pyramide, qu'il s'agisse de sa rampe ou d'éléments de sa structure interne. S'agissant de la manœuvre des blocs permettant de les repositionner sur la nouvelle rampe de montée qui se constituerait alors, on remarquera qu'il est toujours facile de les descendre de quelques mètres sur une courte rampe en bois, en les faisant glisser et en les retenant avec des cordes.

La méthode implique une finition des blocs in situ. La rampe en calcaire permet de hisser les mégalithes les plus lourds grâce à la machine de Khent-Kawes, reconstituée et décrite en début d'article, qui réduit au passage considérablement le nombre d'ouvriers requis. Ceci étant, si les Egyptiens de l'Ancien Empire ont utilisé une telle méthode, c'étaient des architectes, des ingénieurs et des géomètres tout à fait remarquables dont les travaux ne laissaient pas la moindre place à l'empirisme. La réalisation de tels édifices met en œuvre des éléments de géométrie dans l'espace très affinés : concept de rabattement, de récursivité en 3d (très proches de la théorie des groupes) ainsi qu'une perception tout à fait remarquable de la résistance des matériaux (stricto sensu, étant donnée la fréquente absence de liant, la tenue d'une pyramide relève de la « mécanique des sols »). Tout l'édifice a du être entièrement pensé avant le commencement des travaux, lesquels ne sauraient laisser la moindre part à l'improvisation. Paradoxalement cette rigueur implacable s'accommode fort bien de la variation des dimensions des blocs fournis par les carriers, laquelle conduit à des assemblages qui peuvent sembler parfois irréguliers, mais se retrouvent en fait intégrés dans une structure générale correspondant à un positionnement centimétrique de points-clés de la structure.

## 7 - REFERENCES :

- [1] Selim Hassan : *Excavations at Giza*, , IV (1932-1933) pl. XVIII
  - [2] H.Chevrier, Technique de la construction dans l'Ancienne Egypte, Revue d'Egypt.t.22
  - [3] Georges Goyon, *Le secret des bâtisseurs des grandes pyramides*, Editions Pygmalion 1990
  - [4] Newberry, El Bersheh I. pl. XV
-

- [5] G.Goyon, Les Instruments de forage sous l'Ancien Empire, J.E.O.L, 21, Leiden, 1970, p.154-163
- [6] Alexandre Badwy, Architecture in Ancient Egypt, 1966
- [7] Maragioglio-Rinaldi, L'Architettura, III
- [8] R. Engelbach, A.S.A.E., 25, p.167
- [9] Strabon, XVII, I, 30, 30
- [10] I. Moret, Mél. Maspéro , I , fasc. 2, 625.
- [11] G.Goyon, Kersakôre et l'observatoire d'Eudoxe, B.I.F.A.O. 1974, p.135-147.
- [12] G.Goyon, Nouvelles observations relatives à l'orientation de la pyramide de Kheops, Rev. d'Egypt. p.22 (1970) p.85-98.
- [13] W.B.Emery, Archaic Egypt, Penguin Books, 1963, 216
- [14] R.Engelbach, The problem of the Obelisks, London 1923
- [15] G.Goyon, Un procédé de taille du granit par l'action thermique chez les anciens Egyptiens. Revue d'Archéologie, T.28, 76-86
-