

À quoi peut bien servir

Éric Guerrier

le dispositif

architecte DPLG honoraire

coiffant

professeur émérite à l'école nationale supérieur d'Architecture de Marseille-Luminy

la chambre

professeur associé en mastère à l'Euromed

de Kheops ?

expert près la cour d'appel d'Aix-en-Provence



Le dispositif coiffant la chambre de Kheops

Éric Guerrier, nous a fait l'amitié de nous confier l'article ci-dessous que nous publions bien volontiers, tout en précisant que les hypothèses présentées ici sont bien évidemment les siennes.

« La grande pyramide renferme un ensemble de dispositifs originaux, uniques non seulement dans l'histoire des pyramides mais aussi dans celle de l'architecture et de la construction en général. Sur le plan architectural, l'ouvrage plus extraordinaire¹ est sans conteste la grande galerie, tandis que, sur le plan strictement constructif, c'est également sans conteste le dispositif invisible coiffant la chambre haute, dite du Roi (fig. 1).

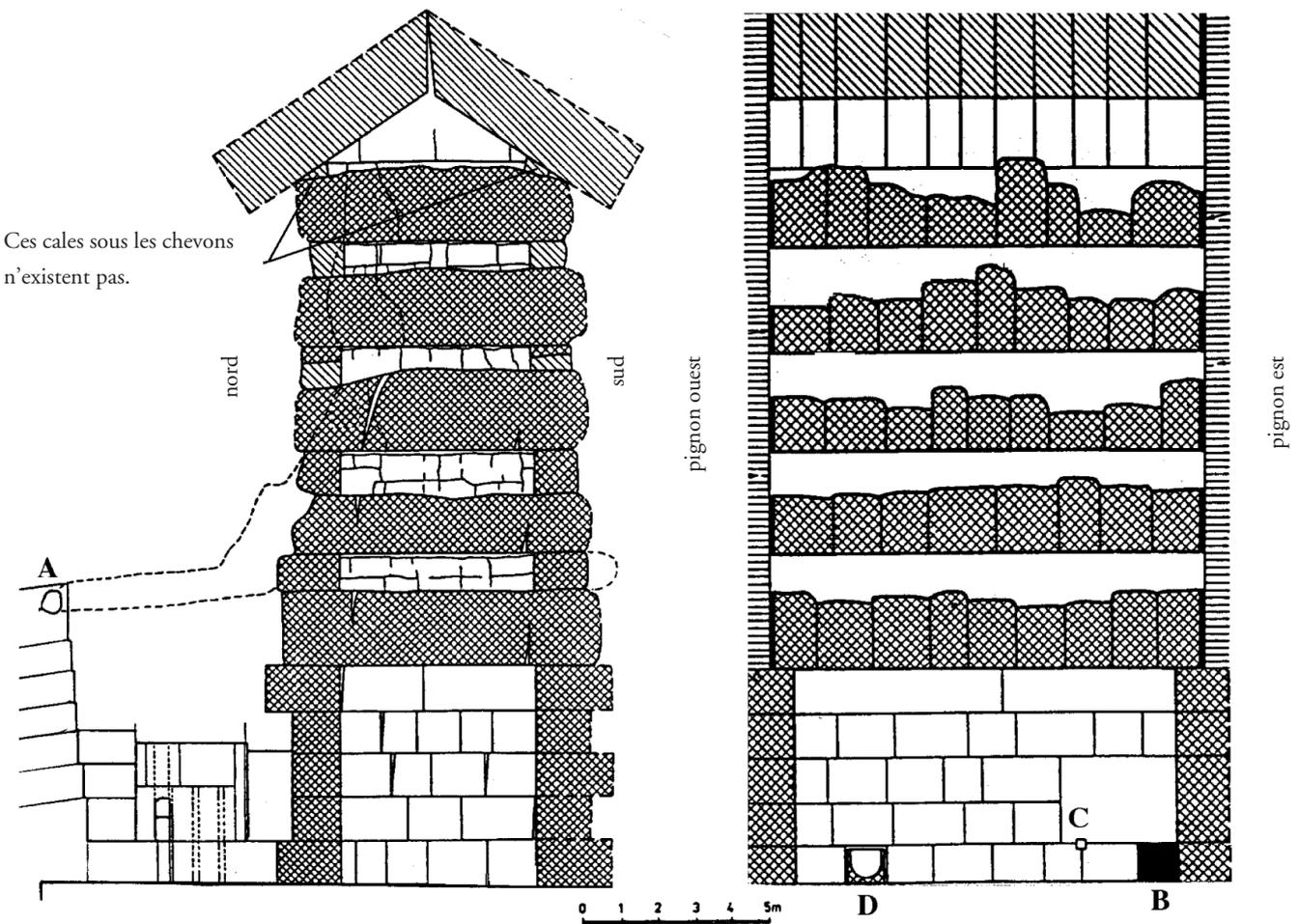


Figure 1 La « chambre du Roi » : coupes nord-sud à gauche, et est-ouest à droite, d'après Perring, Petrie, Maragioglio et Rinaldi. *Attention*, la coupe nord-sud est représentée ici dans le sens inverse de toutes les représentations habituelles qui mettent le nord à droite et non à gauche. En **A**, l'entrée du dispositif découvert par Dixon; en **B**, le trou d'accès à la chambre; en **C**, l'orée du conduit nord et en **D**, le sarcophage. La coupe nord-sud à gauche, comporte une erreur importante : les cales entre le dernier étage de monolithes et les chevrons n'existent pas, ce qui signifie que ces monolithes sont indépendants des chevrons. Sur cette représentation, déjà vieille d'un demi-siècle au moins, on notera également que l'avant-dernier étage de monolithes n'est pas fissuré. En fait, seuls certains monolithes de cet étage sont fissurés. On notera encore sur la coupe est-ouest à droite, que les monolithes latéraux du plafond de la chambre reposent sur les parois des pignons de la chambre, alors que celles des étages sont seulement juxtaposées aux pignons de l'empilement superposé. On notera enfin l'extrême hétérogénéité de profil et de section des monolithes.

Le lieu commun désigne ce dispositif comme un mécanisme de *décharge* servant à soulager le plafond de la chambre des descentes de charges engendrées par l'énorme massif superposé. Certes, seule parmi toutes les chambres des pyramides², celle-ci a été couverte par un plafond horizontal, et d'une portée de 10 coudées, soit 5,23 m, ce qui semble représenter une véritable gageure au cœur d'un tel massif de pierres. Pourtant tout œil un peu averti des choses de la construction, s'aperçoit immédiatement que non seulement les neuf monolithes de granit³ formant la couverture de la chambre ne supportent chacun que son propre poids, mais aussi que les trente-quatre⁴ autres monolithes formant les quatre étages superposés, ne supportent également aucune descente de charges.

Première conclusion

Force est donc de constater que les chevrons, au sommet du dispositif, dévient quasi entièrement toutes les descentes de charges hors de l'empilement des cinq étages de monolithes sous-jacents (**fig. 2**). Il s'ensuit que cet empilement ne sert en rien à décharger quoi que ce soit. Cette conclusion d'évidence repose donc la question de départ : à quoi peut bien servir cet énorme dispositif? Surtout quand cette énormité induit, pour sa mise en œuvre, une somme d'efforts proprement titanesques :

- taille dans la carrière d'Assouan de 43 monolithes pesant de 25 à 65 tonnes ;
- charriage jusqu'au Nil et transport par voie fluviale, puis débarquement et montée sur le plateau jusqu'au chantier ;
- élévation dans le massif de la pyramide à une altitude allant de 50 à 61,5 m ;
- pose et ajustage en place.

Laissons de côté ces questions de mise en œuvre qui constituent déjà un exceptionnel défi technique, et occultent dans l'esprit public les problèmes d'ordre structural demandant une certaine forme sinon de compétence, du moins de culture constructive. Cherchons donc si une réponse, d'une logique constructive simple et dénuée de tout mystère, pourrait être apportée à la question de savoir quelle pouvait être la ou les fonctions de ce dispositif. Il faut pour cela croiser les observations concernant deux types de description :

I. Description des éléments structuraux ;

II. Description de la pathologie.

Mais avant d'y venir, il faut dire que, sauf celle présentée au symposium international d'Athènes du 19 au 23 septembre 1988⁵, pratiquement aucune étude d'ingénierie structurale n'a été publiée sur ce dispositif. Je vais donc faire référence à cette étude.

La description de l'état actuel des éléments structuraux comme de la pathologie qui les affecte, n'est pas aussi aisée qu'il pourrait paraître. En effet, nombreuses sont les publications qui comportent des éléments descriptifs. Mais déjà ces derniers ne sont pas toujours concordants, et aucune publication n'est exhaustive⁶. Il faut dire que le moindre détail peut s'avérer important, et qu'il n'est donc pas possible de détailler chaque pierre, chaque joint, chaque disposition, chaque fissure, selon une liste de descripteurs qui peut elle-même s'allonger quasi indéfiniment et aller jusqu'à la structure intime des matériaux. À ces réserves près, il apparaît que la description la plus minutieuse et complète a été réalisée par Gilles Dormion à partir de 1986. Et c'est d'ailleurs en sa compagnie que les ingénieurs d'EDF ont exploré les lieux. Avec son accord express, ces données servent donc de base à cette étude.

Description des éléments structuraux

Pour procéder à ce type de description (**fig. 2**), il faut bien sûr s'assurer d'abord que les termes employés permettent une désignation correcte des éléments et des ouvrages en question. Or on va voir que, déjà, pour certains de ces ouvrages, la pertinence des termes généralement employés est loin d'être assurée, du fait que les référents adéquats manquent dans notre vocabulaire, aussi bien de l'architecture que de la construction.

Petite digression sur cette question du vocabulaire

L'adage, que m'avait aimablement rappelé Jean Leclant à ce propos, « Ce qui se comprend bien s'énonce aisément », pourrait ici être retourné. En effet, comment espérer comprendre ce qu'on ne peut déjà même pas énoncer clairement avec un vocabulaire dont les contenus sémantiques (architecturaux, techniques, historiques, culturels, etc.) sont connus et reconnus de façon académique? Car il existe sinon un véritable vide, du moins un flou sémantique important pour nommer des éléments et des ouvrages qui, répétons-le, sont non seulement uniques dans l'histoire de l'architecture et de la construction, mais qui ne sont entrés dans cette histoire que tardivement et dans un nouveau chapitre demeuré purement archéologique et propre à l'Égypte. Ainsi, le langage technique classique montre à leur sujet une vraie pauvreté, masquant une difficulté d'autant plus sournoise qu'elle passe inaperçue. D'ailleurs, certains se demanderont sûrement à quoi bon ce « pinaillage » sur les mots⁷. Pourtant cette difficulté est bien réelle, et elle engendre au passage une part importante du « mystère » constructif des pyramides. En effet, l'*innommable* et l'*indicible* dévoient toujours les questions vers la métaphysique et l'ésotérisme. Or les problèmes purement techniques n'ont rien à y faire, et ils ne peuvent sûrement pas y trouver de solution. Il n'est que de lire tous les ouvrages des néophytes sur la question.

Qu'on prenne d'abord l'exacte mesure du fait que tout notre vocabulaire descriptif est issu, dans le langage courant, de la géographie des modèles de constructions répartis sur les différents terroirs européens et, pour la part académique, de l'histoire monumentale des modèles d'édifices, largement baignée dans une culture classique issue de la tradition gréco-romaine, notamment depuis la Renaissance. Tous modèles étrangers à l'Égypte ancienne.

Qu'est-ce à dire? Que, déjà, l'édifice appelé *mer* n'a dans notre culture pas de nom équivalent à ce qu'entendaient par là les architectes de l'Ancien Empire. Ce sont les Grecs qui, deux mille ans plus tard, en ont fait une « pyramide », mot choisi par similitude primaire avec la forme de la seule construction qui lui ressemblait en Grèce, celle du four à chaux. On trouve le même mécanisme de transposition avec *mastaba*, par similitude folklorique avec la forme d'un « banc », en arabe cette fois.

La même difficulté se retrouve pour la désignation des principes de structures constructives et des éléments propres à l'architecture égyptienne, parce que ne trouvant pas toujours de similaires dans nos référents conceptuels, donc dans notre vocabulaire moderne. Un exemple simple, le pylône des temples. Pour donner un autre exemple, extérieur à l'Égypte celui-là, il est quasi impossible de décrire les principes structuraux et de nommer les éléments des charpentes de la pagode asiatique avec notre vocabulaire issu de la charpenterie européenne. Pour préciser encore, lorsqu'on parle d'une « coupole byzantine », d'une « nef gothique » ou d'une « voûte romane », il ne s'agit pas seulement de *style*, c'est-à-dire d'un statut d'ordre esthétique et formel, comme le lieu commun le croit. Chacun de ces adjectifs fait référence à un type de structure constructive qui — bien que ces exemples soient tous trois bâtis en maçonnerie de pierre taillée — obéit à des principes très différents. De plus, elles englobent et sous-entendent tout un détail de référents conceptuels, à la fois structuraux et constructifs, parfaitement définis, connus et reconnus de façon académique.

On constate que tel n'est pas le cas à propos des pyramides et de l'architecture égyptienne en général, pour lesquelles chacun bricole par analogie avec le vocabulaire et les référents classiques. Répétons que cette difficulté engendre un effet d'autant plus pervers qu'il n'est pas reconnu. Ce vide référentiel empêche d'abord d'identifier correctement les ouvrages et les principes constructifs. Pire, il en masque même jusqu'à la perception, sans parler de la conception. Et cette sorte de cécité amène tout droit à nier l'évidence et jusqu'à l'existence même d'états archéologiques pourtant incontestables. Nous allons, au fur et à mesure, en montrer les effets pervers qui se perpétuent au sujet de la question qui nous intéresse ici, notamment en ce qui concerne les macrostructures⁸. Mais déjà, développons quelques-uns de ces faux-sens.

Premier faux-sens. Pour désigner les blocs de granit qui forment la couverture de la chambre du Roi et les étages superposés, c'est par analogie la plus simple que ces monolithes ont été appelés « poutres ». Dans notre univers constructif classique, une poutre a une fonction précise — qu'elle soit en pierre, en bois, en métal ou en béton armé —, qui doit franchir un vide, soit pour rester libre, soit, le plus souvent, pour servir de support à un plancher ou à une couverture. Or, ici, ce n'est pas exactement le cas de figure, puisqu'elles sont jointives et ne supportent rien. Le terme de « monolithes » a donc déjà été préféré à poutres. Monolithe signifiant simplement « une seule pierre », du point de vue structural, ce descripteur apparaît comme parfaitement neutre, c'est-à-dire qu'il ne contient aucune référence à une quelconque fonction constructive. Or, ici, il est évident que les cinq étages de monolithes assument une ou plusieurs fonctions constructives qu'il conviendra de découvrir.

Deuxième faux-sens. Si la sous-face des monolithes qui couvrent la chambre de Kheops forme bien un « plafond », strictement un plafond n'est pas un ouvrage constructif, mais désigne seulement la paroi en sous-face d'un plancher. Cependant, étant ici constitué directement par les sous-faces des poutres juxtaposées, on se trouve devant un cas de figure limite. Pour simplifier, on conservera néanmoins la désignation habituelle de plafond.

Troisième faux-sens. En revanche, il est évident que les monolithes des autres étages superposés n'ont pas pour fonction de constituer autant de plafonds. Il faudra donc attendre d'avoir établi leurs véritables fonctions, pour leur proposer un ou plusieurs noms conformes à ces fonctions ou, du moins, qui ne les contredisent pas.

Quatrième faux-sens. Tous ces étages de monolithes superposés sont séparés par des volumes qui ont été improprement appelés « chambres de décharge ». Or, déjà, il ne s'agit en aucune façon de chambres. Et, comme les monolithes qui les couvrent n'ont aucune fonction de décharge, il convient de trouver à ces volumes une désignation plus conforme à la réalité de leur statut. Dans notre typologie classique, un tel volume entre des étages de monolithes superposés, n'a pas d'exemple, donc pas de nom spécifique. La plus proche analogie en ferait un « comble », même si ce terme désigne habituellement le volume intérieur d'une toiture en charpente. Mais, comme ici, un comble désigne bien un volume neutre, intermédiaire entre deux structures superposées en couverture. On retiendra donc le terme de comble.

Cinquième faux-sens. On vient de le dire, sauf pour celui couvrant la chambre du Roi, désigner, comme cela se fait communément, les étages d'énormes monolithes par « plafonds », ne rend aucun compte de leur fonction structurale. Et, comme pour les combles, il n'existe aucun autre exemple, dans toute l'histoire de l'architecture et de la construction, où de telles structures sont ainsi superposées. Le seul dispositif qui pourrait y ressembler dans la forme, mais pas du tout sur les plans fonctionnel et structural, se retrouve dans l'empilement des étages de charpenterie des pagodes asiatiques⁹.

Après avoir précisé ces premières questions de vocabulaire, dont on va rencontrer d'autres exemples au fur et à mesure, venons-en à la description.

Description structurale

Procédons de façon constructive, c'est-à-dire de bas en haut, en partant de la chambre du Roi. Son dallage, ses parois et sa couverture sont entièrement construits en blocs de granit d'Assouan appareillés *ad quadratum* et parfaitement jointoyés.

Les monolithes des cinq étages sont, également, en granit. Leurs profils et sections sont très variables, leur épaisseur variant de l'ordre du mètre jusqu'aux alentours de 2,50 m¹⁰. Il en va de même pour leur largeur. Seules trois faces sont dressées *ad quadratum*, les faces supérieures présentant un profil variable brut de carrière. La qualité de façonnage des monolithes varie et va en décroissant de bas en haut, au fur et à mesure des étages.

Sur toute leur longueur et la moitié de leur section, les poutres est et ouest du plafond de la chambre sont posées sur les pignons (**fig. 1** à droite).

Les abouts des neuf poutres couvrant la chambre sont encastrés dans les parois nord et sud du massif, sur environs cinq coudées en tout, soit de l'ordre de 2,50 m.

Il en va de même des trois étages suivants, dont toutefois l'encastrement, variable, est beaucoup moins profond.

Les abouts des monolithes des deux premiers étages sont posés sur un libage de granit. Ceux du troisième étage, moins réguliers, sont posés sur des dés de calcaire qui ont manifestement servi de cales d'ajustage sur le libage de granit.

Il en va tout autrement pour le quatrième et dernier étage. D'abord, il est posé sur un libage entièrement fait de calcaire. Ensuite, contrairement à certaines représentations données par les plus grands archéologues (comme sur la **fig.1** ci-dessus, et aussi par le groupe d'Athènes dans sa figure 1, p. 560), qui montrent les abouts des monolithes du dernier étage encastrés sous les chevrons, ces monolithes sont seulement posés sur appuis libres d'une profondeur d'environs une coudée et demie, soit 75 à 80 cm (**fig. 2**).

Enfin, les chevrons, en calcaire de Tourah, viennent coiffer l'ensemble mais, point important, sans prendre appui sur le dernier étage de monolithes. Les talons des chevrons sont contre-butés par des sommiers peu profonds, noyés dans le massif hors des zones de parois dans lesquelles se trouvent les appuis et les encastresments des monolithes. Par référence au double rang qui couvre l'entrée dans la pyramide, à un endroit où les descentes de charges sont sans commune mesure, mais aussi aux chambres des V^e et VI^e dynasties, certaines représentations montrent deux voire trois lits de chevrons superposés. Cet entassement est donc possible ici sinon probable. En fait, on ne connaît même pas l'épaisseur des chevrons apparents, un sondage endoscopique (réalisé par Dormion) ayant buté vers 1,50 m.

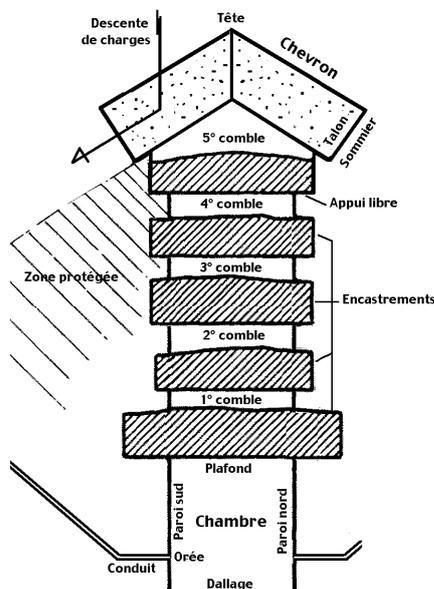


Figure 2 État structural avant désordres : encastrement des quatre étages de monolithes, dernier étage sur appuis libres, chevrons calés dans le massif déviant quasi toutes les descentes de charges. Bien entendu, la descente de charges et la zone protégée se retrouvent également au nord. En **fig. 1**, on a déjà noté la grande hétérogénéité des profils et sections, résultant sans aucun doute de contingences de carrière.

Alors que le plafond de la chambre repose sur les pignons (**fig. 1** à droite), les monolithes des combles et les chevrons sont seulement adossés contre leurs pignons, sans aucune solidarisation. Ces pignons sont constitués d'un libage de gros blocs calcaires, irréguliers, seulement dégrossis et dressés en face vue, dont le jointolement a été assuré avec un mortier maigre plâtreux.

Conclusions

- 1- Prenant uniquement appui dans le massif de l'édifice, le dispositif des chevrons est donc complètement indépendant des étages de monolithes sous-jacents. C'est lui qui supporte la totalité des descentes de charges.
- 2- Ils en dévient la plus grande partie hors des monolithes eux-mêmes, tandis qu'une moindre partie en charge les encastremets.
- 3- Mais le dernier étage, sur appuis libres, se retrouve donc à la fois indépendant des chevrons et du massif de l'édifice.
- 4- En revanche, ayant leurs appuis encastrés, les quatre autres étages, et surtout le plafond de la chambre, se retrouvent solidaires du massif de la pyramide.

Synthèse

Du point de vue structural, le plafond de la chambre et l'empilement superposé ne sont donc sollicités d'aucune façon par les descentes de charges directes qui sont supportées, en totalité, par les chevrons puis déviées dans le massif. En revanche, à cause de l'encastrement de leurs appuis, tous les monolithes, sauf ceux du dernier étage — mais y compris le plafond de la chambre bien sûr —, peuvent être sollicités par tout jeu différentiel pouvant affecter le massif. Et la pathologie montre que tel a bien été le cas.

Mais avant d'examiner cette pathologie et d'en tirer des conclusions, voyons si on peut répondre, au moins en partie, à la question de savoir à quoi aurait pu servir cet empilement dans l'hypothèse où il n'y aurait pas eu de désordres.

Puisque l'empilement ne sert pas à décharger le plafond de la chambre, on peut augurer que les architectes le savaient, sinon ils n'auraient pas mis en œuvre ce dispositif cyclopéen sans une raison impérieuse. En effet, il leur aurait suffi de superposer aux poutres du plafond de la chambre, posées sur appuis libres, un ou plusieurs lits de chevrons (**fig. 3A**).

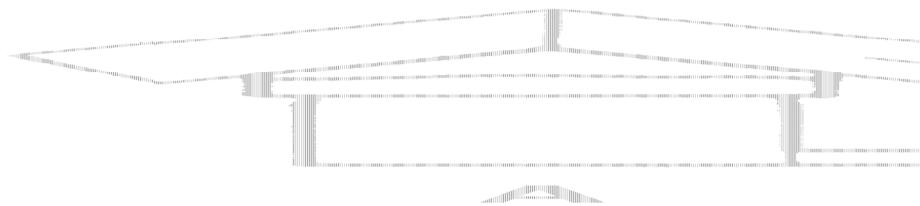


Figure 3 De gauche à droite, on visualise simplement comment, en superposant des combles successifs, on finit par éviter de perturber la grande galerie. Mais on voit qu'avec seulement trois surélévations, en D, le déport de charges est déjà largement au-dessus de la couverture de la grande galerie. Un étage supplémentaire apparaît donc inutile de ce point de vue.

Mais on constate immédiatement que le déport des descentes charge côté nord serait alors venu, non seulement, surcharger accessoirement la couverture de la chambre des herses, mais, surtout, pousser directement sur le pignon de la grande galerie (**fig. 3A** et **B**). Et au moins ce dernier n'aurait sûrement pas résisté. Il devient alors évident qu'il fallait rehausser les chevrons, au minimum de la hauteur de deux combles, pour dévier les descentes de charges hors de l'alignement rampant de la couverture de la grande galerie (**fig. 3C**), et de trois combles pour y échapper plus nettement (**fig. 3D**).

Éviter les poussées latérales obliques sur le pignon de la grande galerie, puis rampantes sur sa couverture, suffirait donc à justifier le rehaussement des chevrons. Toutefois, s'il ne s'agissait que de cela, pourquoi avoir ajouté un étage de plus par rapport à la figure D ?

De même, le nombre des étages et l'énormité des monolithes ne se justifient pas, surtout au regard des problèmes techniques titanesques que leur transport et leur mise en œuvre ont entraînés. En effet, les étages de monolithes auraient, à la rigueur, pu servir de *butons*¹¹ destinés à contenir les effets des poussées horizontales qu'exerce latéralement le massif sur les parois des combles. Mais ces poussées étant relativement faibles, les étages sont donc à la fois trop nombreux et les monolithes énormément surdimensionnés. En effet, il apparaît que chaque comble aurait pu avoir la même hauteur que la chambre, puisque ses parois ont parfaitement résisté aux poussées horizontales. Un seul étage intermédiaire entre le plafond de la chambre et les chevrons aurait donc largement suffi.

Ensuite, la protection de la grande galerie — confinée dans l'angle oriental du dispositif et concernant moins du quart de la longueur de la chambre, tandis que le haut de sa couverture ne mesure que deux coudées (soit 1,05 m) de portée — rendrait la plus grande partie de l'empilement parfaitement superfétatoire.

Enfin, le dernier étage apparaît parfaitement inutile en tant que surélévation mais aussi comme *buton* à cause de ses appuis libres. Du coup, pourquoi avoir mis en œuvre ses huit monolithes, pour environ 250 tonnes, à plus de 60 m d'altitude, sans raison impérieuse ?

Il y a donc quelque forte probabilité pour que la raison d'être de l'ensemble du dispositif ne serve pas uniquement de simple rehausse destiné à protéger la grande galerie, ni même de *buton* contre les poussées latérales du massif. Nous essayerons, ci-après, de proposer une raison structurale plus conforme, mais il faut pour cela décrire, d'abord, puis analyser la pathologie.

Description de la pathologie

Une série de désordres de configuration (**fig. 4**), à la fois claire, bien caractérisée et significative, est survenue dans l'ensemble du dispositif. De bas en haut, ces désordres ont affecté le dallage et les pignons de la chambre, l'orée et le conduit de ventilation sud¹², les monolithes et les combles, enfin les chevrons.

Dans la chambre

Au niveau du sol, le long de la paroi sud, un affaissement d'une valeur moyenne de 5 cm affecte la paroi et le dallage contigu, avec de légers basculements de dalles de sol et ouvertures de joints (désordre relevé par Dormion, mais non répertorié par les ingénieurs d'EDF).

Les deux pignons¹³, oriental et occidental, sont affectés par quelques ouvertures de joints en sifflet entre blocs de paroi (*idem*).

Au plafond, les talons des neuf poutres sont fissurées¹⁴, en sous faces et uniquement à proximité de leur encastrement dans la paroi sud. Certaines fissures ont été maquillées avec un mortier de plâtre coloré. Des traces d'étais sont toujours visibles sous les poutres, à proximité des parois (*idem*).

L'orée et le conduit sud : on sait que les conduits étaient sans doute laissés en attente derrière la paroi de granit — et que l'orée n'était percée qu'au moment de l'inhumation. Or, l'orée sud a été agrandie lors de son percement ayant engendré des tâtonnements¹⁵ qui ont gravement affecté la paroi dans cette zone. Cet agrandissement correspond directement à un léger affaissement différentiel de la partie horizontale du conduit et de la paroi. Le départ de la partie ascendante du conduit a également subi une déformation par affaissement de la masse dans laquelle il est inclus. Il faut préciser que, s'il y a affaissement et déformation du conduit, il n'y a pas eu de rupture (*idem*).

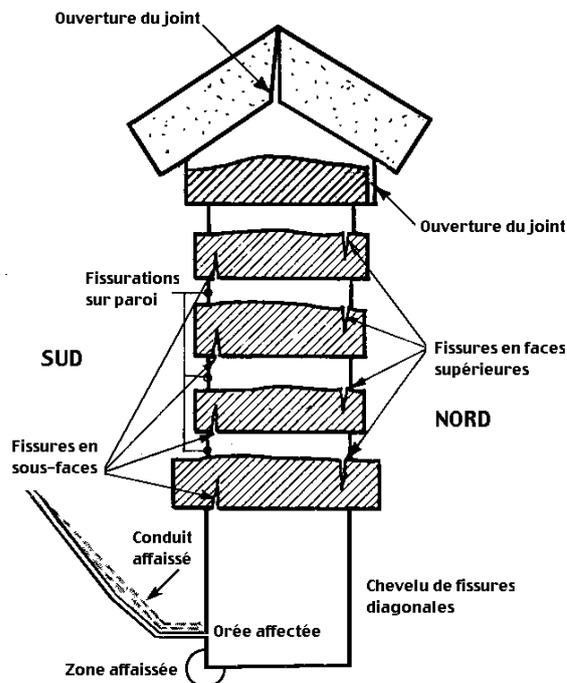


Figure 4 Configuration de la pathologie : localisations des différentes fissurations, affaissement du conduit sud et de son orée, déplacement du dernier étage de monolithes, ouverture du joint entre chevrons et affaissement des chevrons sud.

Les combles et monolithes

Dans le premier comble, les faces supérieures des poutres du plafond de la chambre sont pratiquement toutes fissurées, mais cette fois à l'opposé des fissurations en sous face, c'est-à-dire à proximité immédiate de la paroi nord. Et, là encore, certaines fissures ont été maquillées avec un mortier de plâtre (idem).

La sous-face de la plupart des monolithes des trois étages intermédiaires est également fissurée près de leur encastrement sud, tandis que leur face supérieure l'est du côté de la paroi nord. Donc selon une double configuration identique à celle du plafond de la chambre.

Les lits en granit formant parois des combles entre les premiers étages, et servant d'appuis aux monolithes, montrent surtout des éclatements de lèvres sous les monolithes. Les lits en calcaire sont, en plus, fortement fissurés (idem).

Les monolithes du dernier étage sont indemnes de toute fissuration du même type. En revanche, ils se sont déplacés vers le sud, laissant un vide de quelques centimètres entre leurs abouts nord et le fond des logements d'appui (idem). Configuration significative : les fissurations des monolithes sont toujours au sud en sous faces, et au nord en faces supérieures. Mais certains ne montrent pas de double fissuration. Les configurations des fissures elles-mêmes sont relativement variées. Elles résultent, en fait, d'interactions complexes entre la géomorphologie du granit, la section du monolithe, le plus ou moins bon ajustement de son encastrement, et les efforts qu'il a subis. D'autre part, certains monolithes montrent un très léger déversement dans le sens transversal cette fois.

Les pignons est et ouest des combles, au contraire des pignons de la chambre, sont donc indépendants des monolithes. D'autre part, leur appareil relativement grossier a permis aux joints de jouer, avec des décroûtages du mortier.

Les chevrons

En sous face, le joint longitudinal entre les chevrons s'est ouvert, en moyenne, de 3 à 5 cm.

Conclusions

- 1- Les traces d'étais sous les poutres au plafond de la chambre, comme les réparations de fissures, prouvent que les désordres sont apparus sans doute en cours de chantier, et sûrement avant fermeture de la pyramide¹⁶.
- 2- Tous les désordres affectant la chambre et le conduit sud sont significatifs d'un affaissement du massif dans la zone de la paroi sud.
- 3- La fissuration des monolithes, en sous face au sud et en face supérieure au nord, résulte de leur encastrement dans le massif. Cette typologie de fissuration correspond parfaitement à un effet de cisaillement¹⁷ dû à un jeu différentiel du massif entre le nord et le sud de la chambre. L'état des lits entre combles le confirme.
- 4- Au contraire, ce sont leurs appuis libres qui ont permis aux monolithes du dernier étage de demeurer intacts. Et c'est le même jeu différentiel qui a provoqué le décollement de leurs abouts au nord, les monolithes ayant été légèrement entraînés par leurs appuis sud lors de l'affaissement de ceux-ci.
- 5- De même, l'ouverture du joint entre les chevrons résulte d'un même affaissement des sommiers sud.

Synthèse

La totalité des désordres relève d'un affaissement différentiel du massif le long d'une zone bien localisée, le long et à proximité immédiate de la paroi sud de la chambre, et parallèle à celle-ci.

Diagnostic des causes

Avant de chercher à savoir pourquoi un tel affaissement aussi caractérisé a pu se produire à une telle hauteur dans le massif, et précisément à cet endroit, une évidence apparaît incontestable : l'empilement des étages de monolithes a bel et bien protégé le plafond de la chambre, non pas des descentes de charges, mais d'un tassement différentiel entre les parois nord et sud. D'un point de vue strictement objectif¹⁸, il s'est donc comporté comme un énorme « amortisseur », dont les lames, que représentent les étages, ont résisté au cisaillement résultant du tassement différentiel. Au passage, les fractures des monolithes donnent une idée de l'importance de l'énergie développée par les forces en cause. Un tel cisaillement par affaissement dans le massif ne peut résulter que de deux causes :

- soit une différence de portance dans le sol de fondement ;
- soit une différence de portance dans le massif même de la pyramide.

Différence de portance dans le sol de fondement

Il apparaît immédiatement quasi impossible que les architectes, surtout avec les moyens — à la fois théoriques et techniques — dont ils disposaient à l'époque, aient pu transposer avec précision, 50 m plus haut dans le massif de la pyramide, une faiblesse qui aurait été identifiée dans le sol de fondement. Mieux encore, il est impensable qu'ils aient pu en localiser avec précision le report des effets selon une ligne est-ouest, située à proximité de la paroi sud de la chambre. Même aujourd'hui avec nos moyens de sondage, puis de calcul et de simulation, une telle prévision apparaît extrêmement difficile, pour ne pas dire impossible, avec un tel degré de précision. Il est donc évident que la différence de portance du sol ne peut être retenue.

Différence de portance dans le massif même de la pyramide

La seule cause possible demeure donc un tassement différentiel intervenu dans le massif de la pyramide. La question devient alors : à quelle cause un tel tassement peut-elle correspondre ?

Et c'est là qu'il faut revenir à l'étude des ingénieurs d'EDF. Ils se sont principalement appliqués à modéliser un certain nombre d'hypothèses pour voir si des zones de fissurations apparaissaient, et où. Bien qu'on ait noté que leur état descriptif des structures et des désordres était incomplet et en partie inexact, examinons leur démarche et ses résultats. Pour modéliser l'interaction entre le massif de la pyramide et le dispositif de Kheops, ils se sont servis de logiciels construits pour étudier les problèmes de centrales et conduites souterraines. C'est-à-dire qu'ils ont assimilé le massif de la pyramide à un milieu rocheux relativement homogène. Ils ont alors testé plusieurs hypothèses de déformation, en simulant la question avec la présence de la seule chambre du Roi, puis en intégrant les interactions avec la chambre de la Reine, et enfin avec un certain nombre de cavités cachées.

En tout, quarante simulations qui, sauf deux, ont abouti à des zones de fissuration sur les monolithes exactement inverses de celles constatées : en sous-faces au nord et en face supérieures au sud (**fig. 5**). Au passage, l'interaction de la chambre de la Reine s'est avérée quasi nulle, mais nous y reviendrons. C'est également le cas avec des cavités qui se seraient situées au-dessus du niveau du dallage, derrière les parois nord ou sud de la chambre du Roi.

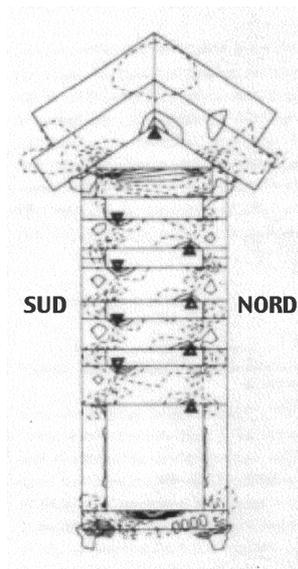


Figure 5 Diagramme des ingénieurs d'EDF correspondant à la plupart des hypothèses de simulation. Les résultats donnent des zones de fissurations exactement inverses de celles constatées.

Cette inversion des zones de fissurations s'explique simplement dans l'hypothèse d'un massif homogène. Si la chambre du Roi avait été implantée dans l'axe de la pyramide, les descentes de charges sur les chevrons nord et sud auraient été symétriques donc égales. Mais l'axe de la chambre ayant été déporté d'une dizaine de mètres vers le sud, il s'ensuit que les descentes de charges sont devenues dissymétriques, et que les chevrons nord se sont retrouvés sensiblement plus chargés que ceux du sud.

En revanche, les deux seules simulations qui vont donner des zones de fissurations similaires à celles des monolithes ont été obtenues soit avec une cavité longitudinale appareillée en granit, c'est-à-dire plus rigide que le blocage environnant, située sous le niveau de la paroi nord de la chambre, soit avec une cavité longitudinale « pouvant correspondre à une chambre foudroyée »¹⁹ située sous le niveau de la paroi sud. Autrement dit, soit un point dur au nord, soit un point faible au sud, sans oublier une possible combinaison des deux. Disons tout de suite que cette combinaison est certainement partiellement en cause, dans la mesure où il s'agit d'un ouvrage complexe dans un massif hétérogène où interagissent plusieurs facteurs. On le comprendra aisément en analysant les deux autres hypothèses.

Hypothèse du point dur au nord

Les ingénieurs d'EDF ont conclu qu'une chambre cachée sous le niveau et à proximité de la paroi nord apparaissait plus qu'improbable. En effet, ils précisent qu'aucune des mesures gravimétriques mises en œuvre par ailleurs n'a décelé d'anomalie pouvant correspondre à l'existence d'une telle cavité. Et d'ailleurs, dans ce cas, la configuration de l'ensemble des désordres, et pas seulement sur les monolithes, aurait été différente sur certains points significatifs.

Au passage, ils ont également conclu que l'interaction avec la chambre de la Reine était négligeable. Mais Gilles Dormion fait remarquer que la simulation a été testée dans l'hypothèse d'une chambre de la Reine couverte d'un seul rang de chevrons. Et il pense que, si la chambre de la Reine est couverte par trois rangs superposés (**fig. 6**), ce cas de figure constituerait une zone suffisamment dure pour justifier l'inversion des zones de fissurations.

Même sans avoir été testée, cette hypothèse soulève néanmoins quelques objections simples au regard de son fonctionnement dynamique. D'abord, la tête des chevrons est éloignée de plus de six mètres de la paroi nord de la chambre du Roi. Ensuite, et à proprement parler, cette tête des chevrons ne constitue pas une «zone» mais se comporte, au contraire de façon ponctuelle, à la façon d'une étrave de brise-glace. Elle a donc tendance à provoquer un poinçonnement inversé, c'est-à-dire vers le haut. Ce poinçonnement se trouvant très proche, sous la tête du caniveau de la grande galerie, puis à peine décalé par rapport au pignon de celle-ci, il aurait donc d'abord commencé par affecter ces ouvrages. Il aurait ensuite affecté la chambre des herses. Or tous ces ouvrages ne montrent rien de tel. Il apparaît donc bien peu probable que ce poinçonnement ait pu déstabiliser uniquement la face sud de l'empilement qui se trouve déporté à près de sept mètres de là. Maintenant, s'il n'y a pas de trace due à cet effet de poinçonnement, il faut admettre que l'ensemble de la zone où est posée la chambre du Roi était, en effet, «dur», mais de façon homogène et que la faiblesse longitudinale doit se trouver localisée dans la zone proche du pied de la paroi sud. Ce qui ouvre plusieurs hypothèses.

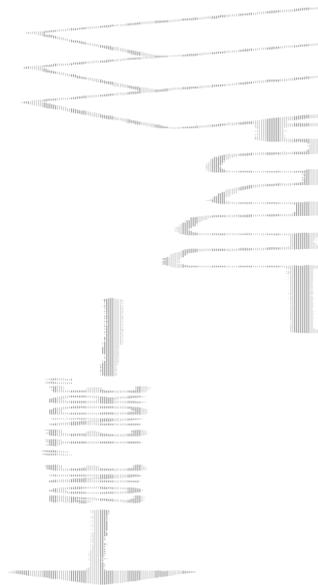


Figure 6 Le point dur constitué par un triple rang de chevrons couvrant la chambre de la Reine, selon le dessin de Dormion. En fait, la présence de trois rangs des chevrons ne constituerait pas une zone dure, mais un poinçonnement, ce qui est tout différent.

Hypothèses d'une faiblesse du massif au sud

Plusieurs hypothèses très différentes pourraient expliquer une telle faiblesse :

- une cavité foudroyée à proximité, sous la paroi sud ;
- un défaut de libage, localisé au même endroit ;
- une différence de libages, limitée au droit de la paroi sud ;
- un plan de clivage à cet endroit, dans la macrostructure du massif.

Une cavité foudroyée à proximité sous la paroi sud

Les ingénieurs d'EDF ont donc proposé que l'affaissement ait été provoqué par l'effondrement d'une telle cavité, dans une zone proche du pied de la paroi sud. Mais on peut immédiatement se demander si un tel accident n'aurait provoqué qu'un affaissement de l'ordre de 5 cm et surtout réparti de façon quasi homogène sur toute la longueur de la chambre.

Un défaut de libage localisé au même endroit

Sans doute conscients de cette improbabilité, les ingénieurs ont alors proposé qu'il puisse s'agir d'un « vide de construction » ou alors d'une « zone affaiblie par dissolution de mortier ». Mais on sait que, sauf exception, le libage n'est pas lié avec du mortier. La faiblesse devrait donc résulter d'un vide accidentel dans un massif par ailleurs considéré comme relativement homogène. Mais un tel aléa qui aurait suivi toute la longueur de la paroi de la chambre, avec une faiblesse homogène, relève de l'improbable. Surtout que les architectes ont sûrement dû veiller à la bonne exécution des libages dans cette zone dont ils ont, de toute évidence, jaugé l'importance.

De plus, dans ce cas de figure d'un défaut aléatoire, les architectes n'auraient pas pu prévoir la fonction d'amortisseur de l'empilement, et ce dernier n'aurait donc pas pu être mis en œuvre pour contrer les effets d'un tassement imprévisible.

Une différence de libages limitée au droit de la paroi sud

Jean Kérisel a publié un mauvais croquis (fig. 7), repris par certains auteurs²⁰. On y voit la structure dans le massif divisée en deux types de libage séparés par un plan de clivage quasi vertical le long de l'extérieur de la paroi sud. Les ingénieurs d'EDF semblent avoir ignoré cette configuration qui aurait sans doute induit une autre hypothèse, simulation et conclusion.

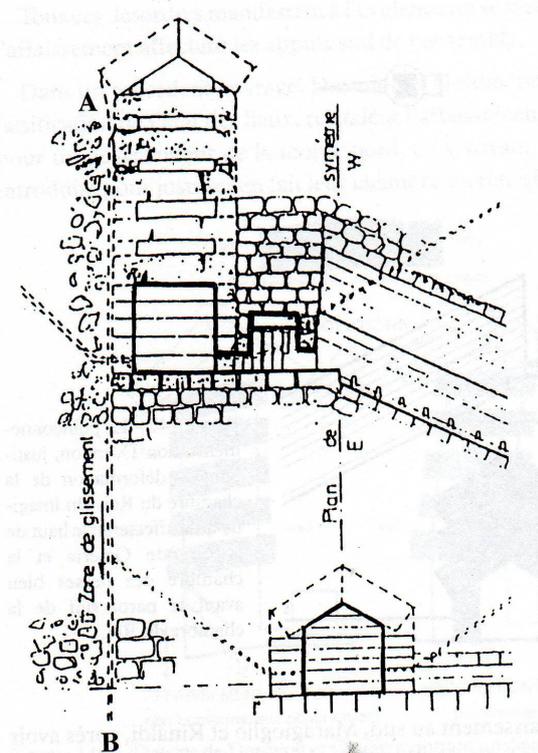


Figure 7 L'état des libages (mauvais croquis

de Kérisel dont il ne donne pas la source).

Le plan de clivage AB est représenté

quasi vertical, mais est-ce bien la réalité?

faute d'avoir sondé réellement et sur toute la hauteur, notamment de l'empilement.

On notera que ce dessin représente, à tort, le dernier étage de monolithes encastrés sous les chevrons.

Dans ce cas de figure, la chambre se serait retrouvée fondée sur un massif relativement bien appareillé, tandis qu'en bordure de sa face sud le massif serait constitué d'un contre blocage plus grossier. Il est donc évident que cette différence de microstructure, si elle était avérée, aurait dû préexister non seulement à la mise en œuvre de la chambre, mais au projet même de la positionner à cet endroit.

La question deviendrait alors: pourquoi les architectes auraient-ils préalablement mis en œuvre des massifs différents, et tout justement limités en bordure de la future chambre? Car cette disposition les aurait ensuite obligés à construire un ouvrage titanesque pour en contrer les tassements différentiels inévitables. Ce serait là un processus de conception et de mise en œuvre véritablement absurde. Si cette différence de structure existe au sein du massif, il faut donc tenter de savoir à quoi elle pourrait correspondre.

Comme il y a tout lieu de penser qu'au moins trois projets modificatifs principaux se sont succédé dans la disposition des chambres et des couloirs de cette pyramide, retenons-en l'hypothèse: après abandon d'un premier projet avec chambre souterraine (**fig. 8 A**), le second projet était celui la chambre dite de la Reine (**fig. 8 B**). Son accès devait alors se faire par le couloir ascendant qui devait ensuite être obturé par vingt-six à vingt-sept blocs bouchons entreposés dans la grande galerie²¹. Il faut donc admettre qu'initialement celle-ci n'aurait été qu'un simple réservoir à bouchons²². Kheops, peut-être impressionné par l'inutilité de sa magnificence, décida-t-il que la grande galerie changerait de fonction pour devenir un couloir monumental montant vers sa chambre d'éternité?

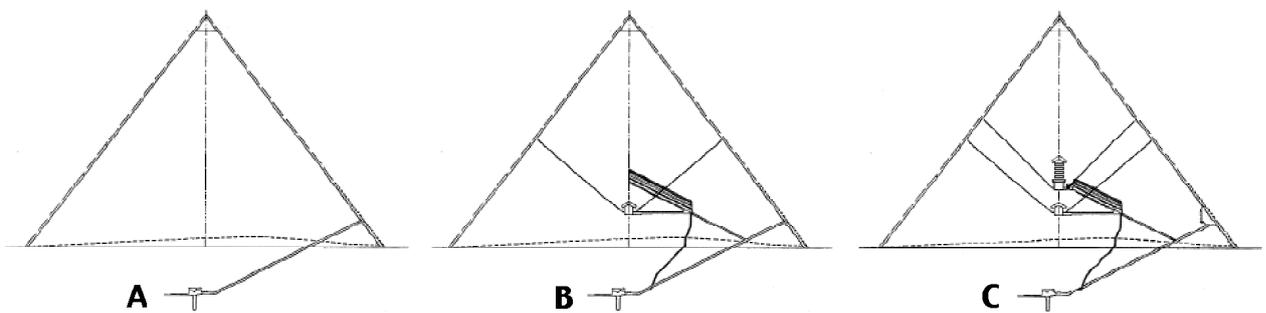


Figure 8 Hypothèses des projets successifs: en **A** projet initial, en **B** second projet, et en **C** chambre du Roi, si elle avait été centrée. Bien sûr, d'autres stades intermédiaires sont vraisemblables, mais là n'est pas notre sujet.

Quoi qu'il en soit, pour qu'il ait pu en juger, encore aurait-il fallu que la grande galerie ait été assez avancée. Le rebouchage des mortaises dans les parois latérales prouve, déjà, l'abandon de sa fonction première et qu'au moins le caniveau était terminé sur toute sa longueur. Mais aussi une partie des parois devait-elle être montée, au moins jusqu'à la troisième assise²³. La tête du caniveau étant arrêté exactement dans l'axe la pyramide, le positionnement de la nouvelle chambre, avec ses sas, s'est donc retrouvé fortement déporté vers le sud, cas unique dans toute la séquence des pyramides. Si ces parties de la grande galerie n'avaient pas été achevées sur toute leur longueur, il aurait été facile de positionner la nouvelle chambre dans l'axe de la pyramide, au-dessus de celle de la Reine²⁴ (**fig. 8 C**). Si tel n'a pas été le cas, n'est-ce pas, justement, parce que l'avancement du massif devait alors être tel qu'il n'était guère envisageable de ramener la chambre du Roi dans l'axe sans devoir démonter une partie considérable du massif déjà en place et aussi de la grande galerie?

Maintenant, du point de vue macrostructural, si la pyramide était construite par grands lits horizontaux successifs, selon le rythme des jardins extérieurs aujourd'hui apparents, avoir prévu dans le massif, sous l'emplacement de la nouvelle chambre, un socle distinct bien appareillé apparaît comme particulièrement conjectural. De plus, l'avoir limité tout juste au droit de sa paroi sud serait, sinon absurde, du moins injustifiable. Et plus encore si l'empilement des combles avait été prévu dans le même temps pour en contrer le

tassement différentiel devenu inévitable. Un tel processus, conceptuel comme de mise en œuvre, défierait à nouveau le simple bon sens constructif dont, par ailleurs, les architectes des pyramides ont donné partout tant de preuves manifestes.

Cependant, il existe une sortie de bon sens qui évite l'absurdité de cette impasse récurrente. Pour cela il faut faire un détour par une investigation sur la configuration interne du massif pyramidal. En effet, la présence de cette différence de libage, et tout justement à cet endroit devenu critique pour la chambre du Roi, pourrait-elle résulter d'un principe général de macrostructure du massif?

Un plan de clivage à cet endroit dans la macrostructure du massif

Il est quasi unanimement admis que le massif des grandes pyramides a été monté par grands lits horizontaux occupant, à chaque nouveau lit, toute la surface de la section du volume pyramidal, gradin après gradin. Mais est-ce bien le cas? En effet, déjà cette configuration structurale n'est déjà pas celle des trois premières pyramides dites « à degrés »²⁵ de la III^e dynastie, de Djéser, Sekhemket et Khaba (fig. 10).

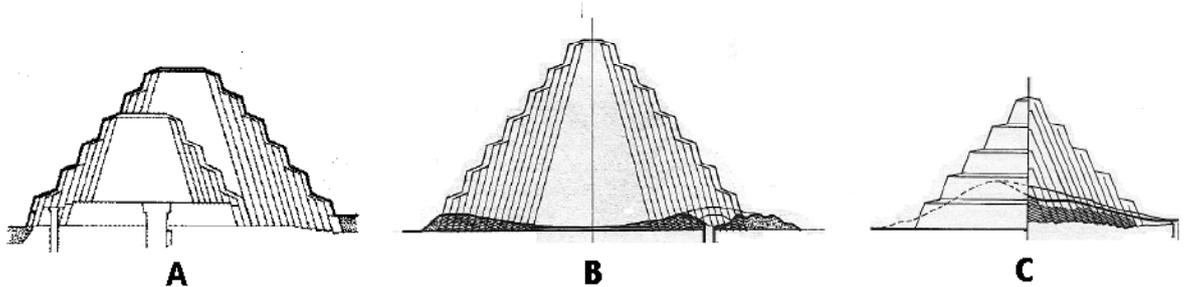


Figure 10 La réalité archéologique de la macrostructure par noyau et accrétions, qu'on pourrait désigner par structure à degrés adossés, parfaitement visible *in situ*, est correctement représentée sur les coupes des trois premières pyramides à degrés de la III^e dynastie. De gauche à droite: en A, Djéser (d'après Lauer), en B, Sekhemket (d'après Gonheim, Lauer et Stadelman) et, en C, Khaba (d'après Stadelman et Dodson). Seule la pyramide de Khaba pourrait correspondre au processus, selon Choisy.

Conformément à ce qu'on peut en voir sur place, et contrairement à ce qu'on peut en lire, les pyramides de la III^e dynastie, au moins, ne sont pas montées comme des « mastabas superposés » (fig. 11) correspondant chacun à la hauteur d'un degré, ni *a fortiori* par grands lits horizontaux. Leur massif interne est au contraire parfaitement structuré, et ce d'une façon unique dans l'histoire de la construction.

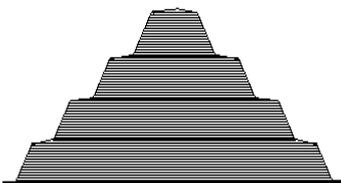


Figure 11 — La structure à « mastabas superposés », construits par grands lits horizontaux, formellement contredite par l'état archéologique de toutes les pyramides dont la macrostructure est visible à cause de leur délabrement. On pourrait la désigner par « structure à degrés superposés ».

À nouveau, un problème de vocabulaire

1— Cette structure interne massive de la pyramide à degrés n'a ni exemple ni statut, donc pas de nom dans le vocabulaire classique. En fait, il s'agit bien d'une « macrostructure » qui comprend d'abord un tronc de pyramide central, aux faces très raides, qu'on appellera « noyau », faute d'un nom déjà codifié dans notre vocabulaire. À ce noyau sont accolées successivement des sortes d'enveloppes de hauteur dégressive, que les archéologues ont désignées de façon différente, preuve d'un embarras sémantique évident: contre-murs, murs inclinés, tranches accolées, strates, soutènements, sans parler des « blocs ceintures » traduisant l'anglais *girdle stones* qui n'a, cette fois carrément aucun sens. Si ce ne sont, strictement, ni des murs, ni des contre-murs, ni des soutènements: il y a un peu de tout cela dans ces structures, mais le modèle de leur fonctionnement statique et dynamique apparaît parfaitement original.

2– **Comme cette macrostructure interne** n'a pas de statut ni de nom générique, comment envisager cette chose innommable? D'autre part, si elle n'a pas de modèle dans notre ingénierie, comment conceptualiser son fonctionnement statique et dynamique? Même si des règles de calcul, du genre de celles mises en œuvre par les ingénieurs EDF, ou de statique graphique (**fig. 12**), peuvent être bâties, il n'en préexiste pas de modèle codifié avec un nom, comme pour toutes les autres structures qui ont déjà un statut dans le vocabulaire issu de l'histoire de nos constructions.

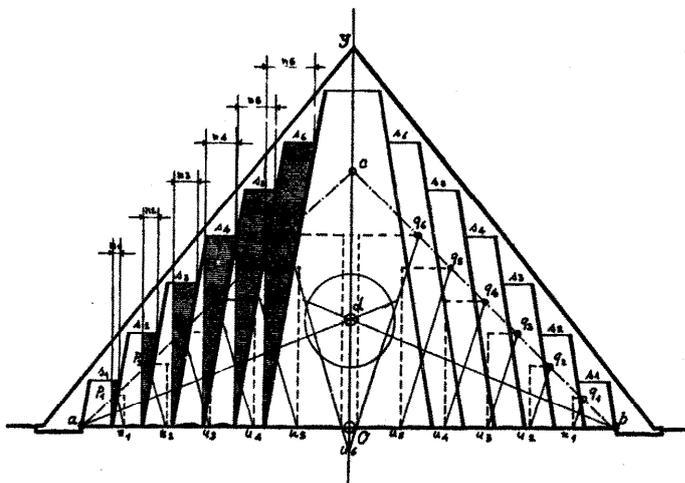


Figure 12 Le diagramme de statique dynamique selon l'ingénieur suisse Hermann Strub-Rössler (1952).

Visualisé en foncé, la part du poids propre de chaque accréation qui s'appuie sur la précédente. Hélas, Strub-Rössler a discrédité la part correcte de son travail en proposant un processus et des procédés de montage du parement pour le moins improbables, surtout à l'époque, notamment machines trop sophistiquées avec rotules, poulies, cabestans, etc., sûrement inconnues à l'époque.

Et du coup, même si cette macrostructure est parfaitement visible, curieusement tout se passe comme si elle n'était pas réellement perçue. Ainsi, un égyptologue et architecte aussi emblématique que Jean-Philippe Lauer n'en a tiré aucune des conséquences, pourtant évidentes, sur le processus de construction. En effet, une telle macrostructure ne peut pas être montée à l'aide des rampes droites qu'il avait retenues comme seul procédé constructif possible. Mieux, Georges Goyon est même allé jusqu'à nier explicitement l'existence de cette macrostructure, au motif qu'elle n'était pas constructible avec ses rampes enveloppantes. Et ils ne sont pas les seuls à avoir tenu ce genre de raisonnement, défiant la logique comme un état archéologique pourtant incontestable.

Répetons que ce type de macrostructure ne se retrouve que dans les pyramides, dans certains mastabas²⁶ et dans les obélisques solaires, mais seulement à l'Ancien Empire²⁷. C'est donc la raison pour laquelle il n'a ni nom dans notre vocabulaire technique, ni statut dans notre univers conceptuel, donc dans nos référents académiques. C'est d'abord ce manque qui handicape notre manière de percevoir la morphologie interne de ces édifices, puis d'en décrire le fonctionnement à la fois statique et dynamique, enfin d'en déduire les processus constructifs possibles ou impossibles.

Il convient donc d'abord de chercher une désignation qui corresponde, au moins, à cette morphologie particulière et à son fonctionnement et qui permette donc de les décrire et d'en discuter correctement.

En ce qui concerne la morphologie, comme ces enveloppes successives viennent s'ajouter les unes aux autres autour du noyau, augmentant le volume au fur et à mesure, le terme qui en rend le mieux compte est celui d'«accréation», d'ailleurs utilisé par Choisy. Hélas, Choisy en induit un processus schématique de structuration constructive (**fig. 13**), qui, tel quel, se trouve démenti par l'archéologie, mais qu'on retrouve d'une certaine façon moins schématique, au moins chez Khaba (**fig. 10 C**) et à Meïdoum (**fig. 16**).

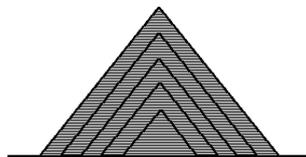


Figure 13 — La structure à accrétions selon Choisy. Strictement, il n'y a pas de noyau, mais une pyramide embryon sur laquelle se superposent des accrétions de forme pyramidale constante.

Hélas encore, le terme d'accrétion ne rend pas compte du fonctionnement de cette macrostructure. Car il ne s'agit pas seulement d'une morphologie statique. En effet, les accrétions étant inclinées, elles viennent s'adosser au noyau puis successivement les unes aux autres. Et cet adossement statique engendre une dynamique d'ensemble : chaque accrétion transmet une part de ses charges propres à la précédente qui en transmet à son tour une partie à celle qui la précède, et ainsi de suite jusqu'au noyau où toutes les charges issues des adossements aux quatre faces viennent s'annuler en se contre-butant. La dynamique du système apparaît clairement lorsqu'on imagine l'ensemble secoué par un séisme : la tendance à l'écroulement s'exerce vers l'intérieur et en conforte la stabilité au lieu de le faire s'écrouler. Une désignation simple semble pouvoir être retenue : macrostructure à *degrés adossés*. Inventé par Imhotep, ce principe réellement génial de fonctionnement statique et dynamique du massif pyramidal explique pourquoi les pyramides de l'Ancien Empire ont si bien résisté à l'écroulement — et certainement beaucoup mieux que si elles avaient été construites par grands lits horizontaux.

À ce confortement macrostructural vient s'ajouter un confortement par la microstructure. Dans les pyramides à degrés, au moins, les accrétions sont non seulement élevées indépendamment (**fig. 15**), mais leur microstructure par lits de pierres est déversée vers l'intérieur²⁸ (**fig. 14**). L'effet dynamique de ce déversement, on l'imagine aisément, accentue et augmente la stabilité de l'ensemble, puisque chaque lit a tendance à glisser vers l'intérieur en venant contre buter la face de l'accrétion précédente, contrariant encore mieux les tendances à l'écroulement.

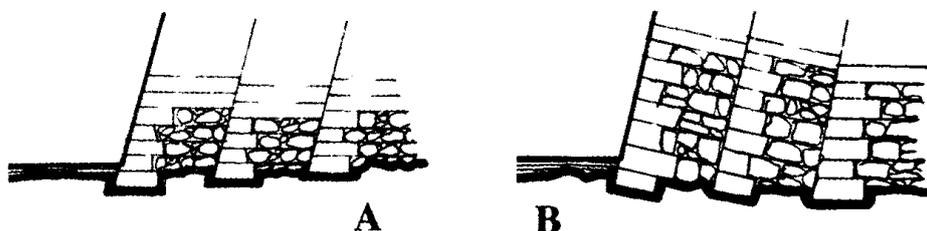


Figure 14 Les deux appareils possibles des accrétions. En A, par lits horizontaux classiques ; en B, par lits déversés propres aux pyramides de la III^e dynastie (le noyau est représenté à lits horizontaux, mais il peut également être bâti à lits déversés comme on le voit chez Sekhemkhet, en **fig. 10 B**).

Autre caractéristique intéressante de cette macrostructure, les plans de clivage séparant noyau et accrétions permettent certains jeux différentiels, notamment de tassement des sols, sans engendrer de désordres notables. Il suffit de faire le tour de la pyramide de Djéser pour s'en rendre compte (**fig. 15**).

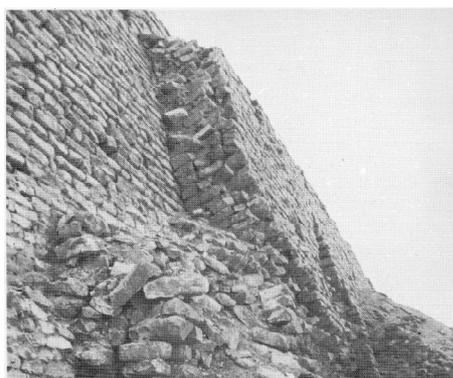


Figure 15 — En face nord de la pyramide de Djéser, certain délabrement dévoile comment une accrétion s'adosse à la précédente, en toute indépendance des appareils (photo personnelle).

Vient ensuite la pyramide de Meïdoum, attribuée à Houni ou à Snéfrou, qui est structurée de la même façon (fig. 16).

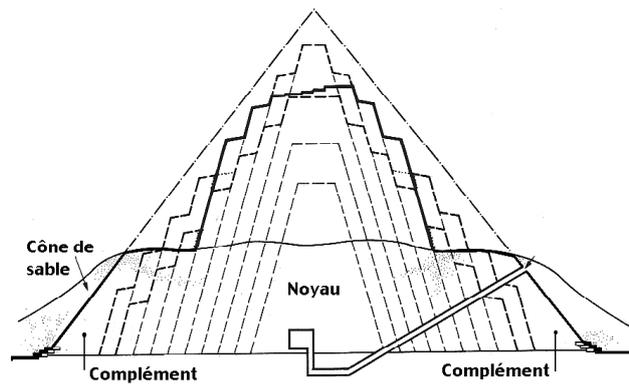


Figure 16 Coupe sur la pyramide de Meïdoum montrant l'état de la macrostructure par noyau et accrétions, plus la partie existante du complément lisse sous le remblai de sable éolien (d'après Wainwright). La pyramide étant partiellement ruinée, le profil gras indique l'état actuel. On notera les surélévations successives du noyau, un peu comme chez Khaba (fig. 10 C).

Mais elle comporte, entre autres, une innovation très importante: le volume à degrés a commencé d'être enchâssé dans une dernière enveloppe générale recouvrant les degrés, lui donnant la forme réellement pyramidale cette fois. Cette enveloppe n'a pas non plus de statut, donc de référence et par voie de conséquence pas de nom spécifique. Hérodote la désigne simplement par «pierres de complément», terme neutre au regard de sa fonction. Et il ajoute un point très important: le complément serait monté après que la pyramide à degrés a été achevée. Même si Hérodote ne prend connaissance de ce processus qu'au V^e siècle avant notre ère, c'est-à-dire deux millénaires après l'Ancien Empire, l'étude archéologique semble bien valider ce processus.

Il faut dire que la question n'est pas tranchée de savoir la raison de ce masquage de la pyramide à degrés sous une forme lisse. Bien sûr, comme tout en Égypte, ces formes répondent d'abord à des impératifs d'ordre symbolique. Si on sait par les textes que la forme à degrés symbolise bien un escalier²⁹, on vient de voir qu'elle répondait aussi à des impératifs purement techniques, parfaitement clairs et maîtrisés. À propos de Meïdoum, il est assez généralement admis que le complément a été rajouté pour conforter le volume à degrés, peut-être après les désordres et aléas survenus dans la Rhomboïdale. Certains, à la suite de Kurt Mendelssohn notamment, ont également cru pouvoir diagnostiquer un effondrement d'une partie des accrétions à cause de leur élancement. Mais la thèse de l'effondrement comme l'argument d'un confortement à l'aide du complément, ne résiste pas à l'analyse structurale. En effet, alors que les accrétions sont montées par lits déversés, prétendre les conforter avec un complément appareillé par lits horizontaux serait un contresens sur le plan de statique dynamique. Or les constructeurs ont partout montré qu'ils ne commettaient pas ce genre de bévue. Mais, même en admettant, l'invention du complément apparaît relever plutôt d'un impératif uniquement formel et d'ordre symbolique. Notons que les sept petites pyramides de la même époque (El Kola, Edfou, Éléphantine, Sinki, Ombos, Zawièt-el-Meïtin et Seïla) sont structurées par noyau et accrétions, mais sans complément (fig. 17)³⁰.



Figure 17 Deux des sept petites pyramides de la III^e dynastie: à gauche, Sinki (d'après Dreyer et Swelim) et El-Kola, à droite (d'après Stienon). Nul doute possible sur la macrostructure à noyau et accrétions.

Arrivent alors les quatre grandes pyramides de la IV^e dynastie : la Rhomboïdale, la Rouge, Kheops et Khephren³¹, dont la structure du massif n'est pas visible du fait du bon état de conservation du complément. En ce qui concerne Mykérinos, la tranchée en coupe réalisée par Othman révèle l'existence d'un noyau flanqué de trois grosses accrétions très raidies, cachées sous le complément parfaitement conservé³². Mais, toujours, même cécité et, malgré l'évidence, soit cette macrostructure n'est pas reconnue, soit on admet que la pyramide à degrés sous-jacente serait constituée non pas à degrés adossés, mais superposés. Pourtant, les petites pyramides de Kheops et de Mykérinos sont, sans conteste possible, structurées à degrés adossés, les compléments ayant pratiquement disparu. Il en va de même pour ceux des mastabas dont les structures ont été objet d'investigations, sans que personne n'en tire de conclusion³³. Edwards a, au moins, admis qu'il n'y avait aucune raison à ce que les grandes pyramides n'aient pas été montées, comme toutes les autres, à degrés sous leur complément pyramidal. Mais il ne s'engage pas sur l'adossement ou la superposition des degrés, et n'en tire aucune conséquence, lui non plus.

Ensuite, toutes les pyramides des V^e et VI^e dynasties encore en état montrent des degrés sous leur complément délabré. Bien sûr, on ne voit pas directement la macrostructure des degrés, et les deux principes se retrouvent selon les auteurs (fig. 18). Au moins, les obélisques solaires d'Ouserkaf et de Niouserré à Abousir montrent-ils une structure adossée élémentaire avec un noyau flanqué d'une accrétion (fig. 19).

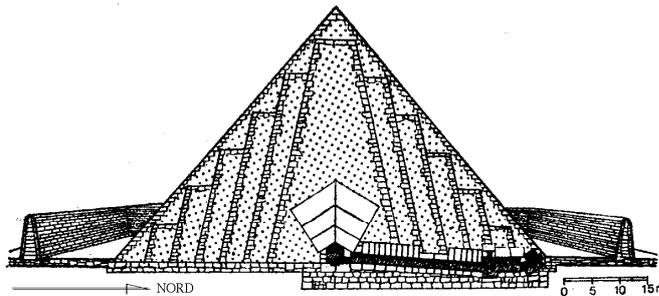


Figure 18 Coupe de la pyramide de Sahourê (d'après Borchardt), mais d'autres, comme Audran Labrousse, voient les degrés superposés.

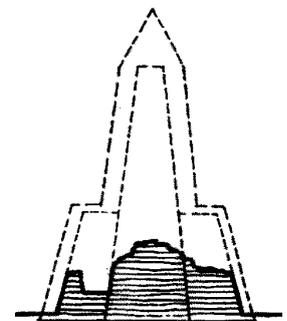


Figure 19 Coupe de l'obélisque solaire d'Ouserkaf à Abousir (d'après Ricke).

Dans une telle séquence étalée sur cinq siècles, tout au long de l'Ancien Empire, penser que seules les quatre plus grandes pyramides auraient été montées par grands lits horizontaux, sans macrostructure intérieure à degrés, relève déjà d'une improbabilité à la fois technique, mais aussi ethnologique et symbolique. Ceux qui admettent que les grandes pyramides puissent être montées à degrés sous leur complément lisse, comme Edwards, Labrousse ou Dormion, ne pensent pas possible que ces degrés soient adossés, mais superposés. Ce qui reviendrait à admettre une révolution conceptuelle et technique, de plus régressive. Cette hypothèse contraire tout ce que montrent les mécanismes mêmes de toute évolution ou révolution ; du point de vue constructif, les deux principes sont si radicalement différents sur les plans à la fois conceptuel et pratique, qu'ils ne peuvent en aucune façon constituer des variantes sur un thème commun.

Que les quatre plus grandes pyramides aient également été structurées par degrés adossés sous la forme pyramidale ne relève donc pas totalement du domaine de la conjecture, mais restons prudents. L'état de conservation de ces pyramides empêche déjà les degrés d'apparaître sous le complément. À l'intérieur, le gainage des parois des couloirs et des chambres, empêche également les éventuels plans de clivage entre accrétions de apparaître. Mais chez Kheops, au moins, ne devrait-on pas les retrouver dans la percée d'Al-Mamoun et dans les combles ? Selon le nombre et l'épaisseur d'éventuelles accrétions, le percement d'Al-Mamoun devrait traverser un, deux, voire trois plans de clivage. Dormion dit les avoir

cherchés en vain. Mais il m'a semblé en distinguer un, très raidi, visible sur la gauche en entrant vers le milieu du passage³⁴. Mais il est vrai que l'état des libages traversés est tel qu'il faudrait procéder à une investigation approfondie, qui n'a jamais pu être menée, pour infirmer ou confirmer la présence de différences de structure. En supposant que la morphologie des accrétiens de Kheops soit similaire à celle de Mykérinos, c'est-à-dire d'une épaisseur de l'ordre de 15 coudées, ce joint, mis en corrélation avec un éventuel joint proche de la paroi sud de la chambre, correspondrait à un rythme de 7 accrétiens. Et ce rythme pourrait par ailleurs correspondre assez bien au spectre gravimétrique (fig. 20).

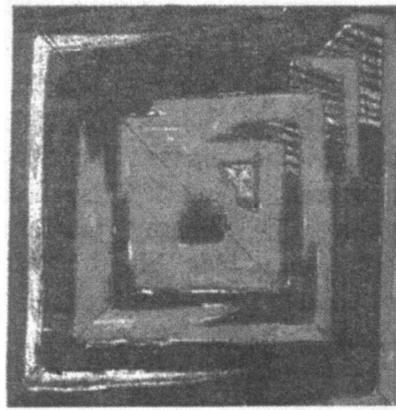


Figure 20 Spectre gravimétrique en plan (d'après Laskmanan, Baron, Delétie et Bui, avec la Compagnie française de géophysique et le soutien d'EDF). Les mesures ont été faites à partir des gradins de l'état actuel. Les divers grisés indiquent des densités variant de 1,98 à 2,27, ce qui veut déjà dire que la masse est constituée de façon hétérogène, prouvant que le type de pierre et leur appareil varient. Cette hétérogénéité n'est pas répartie selon des plans horizontaux, mais se répartit selon des tracés concentriques montrant une certaine régularité.

Or cette configuration ne s'explique surtout pas par l'existence de rampes intérieures. En revanche, une macrostructure interne par noyau et accrétiens donnerait un tel spectre. Le fait que la régularité ne soit pas parfaite, et ne permette pas de donner un nombre précis (entre 7 et 11) de strates, pourrait en partie provenir du fait que le noyau et les accrétiens sont inclinés, alors que les mesures de gravité sont nécessairement plombées à la verticale. Chacune d'entre elles a donc pu rencontrer simultanément, outre le noyau, jusqu'à trois accrétiens. La stratification comme les différences de densité s'expliqueraient assez bien par le fait que les faces du noyau et des accrétiens sont bien appareillées, donc plus denses, alors que leurs corps sont réalisés avec un libage grossier comportant une bonne proportion de vides comme on le voit bien dans la percée d'Al-Mamoun.

Dans les combles, il est vrai qu'il n'y a aucune trace de clivage sur les pignons, où les joints entre le noyau et la première accréction devraient transparaître. Mais, hypothèse³⁵, il se pourrait que ces pignons aient été montés au fur et à mesure, comme des parois non seulement indépendantes des monolithes, mais aussi du massif adjacent. Surtout s'il y avait un plan de clivage à cet endroit, l'opération de montage des pignons pourrait avoir été dissociée du montage du massif. Ce processus est d'ailleurs habituel quand il s'agit d'inclure au sein d'un massif un ouvrage complètement différent du point de vue des structures, des fonctions et des mises en œuvre, ce qui est ici le cas.

Après John Greaves au XVII^e siècle, Ludwig Borchardt avait eu au moins l'intuition de cette macrostructure, puisqu'il a dessiné une coupe nord-sud de la Grande Pyramide avec un noyau relativement incliné³⁶ flanqué de quinze accrétiens (fig. 21).

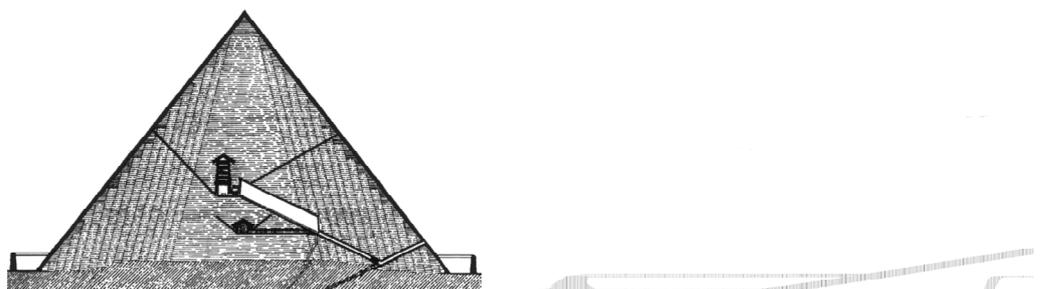


Figure 21 À gauche, la coupe de Borchardt avec 15 accrétiens et, à droite, celle (mal) redessinée par Georges Goyon qu'il donne *selon Borchardt*... avec 22 accrétiens.

Curieusement, on trouve plus souvent représentée une coupe donnée comme *selon Borchardt* avec un noyau plus raide flanqué d'une vingtaine d'accrétions (**fig. 21**). Et dans cette représentation, au contraire de celle de Borchardt, le plan de clivage entre le noyau et la première accrétion passe, justement, près de la tête des chevrons et du pied de la paroi sud de la chambre. Mais, sans doute, Borchardt, prenant comme référence Meïdoum plutôt que Mykérinos, a-t-il mal estimé la pente et le nombre des accrétions.

Poussons alors l'hypothèse, en admettant que tous les ouvrages situés au sud de la chambre du Roi et de l'empilement superposé auraient bien été implantés pratiquement à cheval sur le plan de clivage entre le noyau et la première accrétion (**fig. 22**).

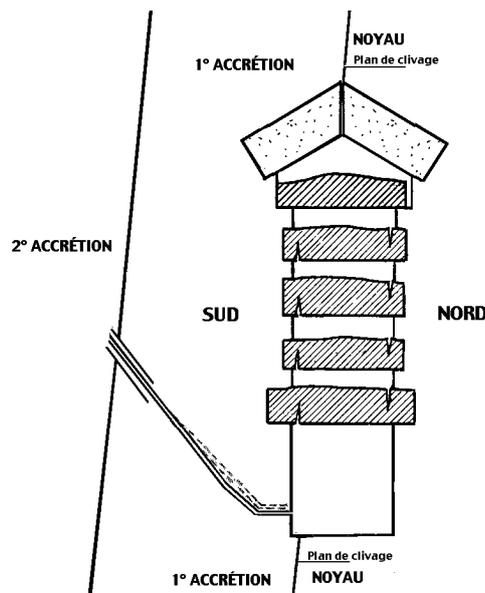


Figure 22 Coupe montrant où pourrait passer le joint de clivage entre le noyau et la première accrétion, affectant la paroi sud de la chambre. Alors que tous les appuis nord des monolithes et chevrons se trouvent dans le cœur du noyau, ceux du sud se retrouvent dans la première accrétion.

L'hypothèse de la macrostructure par noyau et accrétions apparaît comme celle qui rendrait le mieux compte des désordres et de la raison d'être de l'énorme dispositif avec la fonction d'amortisseur. Mais, même dans ce cas, une question demeure encore : à quoi peut bien servir le dernier étage de monolithes ?

Quelle pouvait être la fonction du dernier étage de monolithes ?

Il suffit de supprimer ce dernier étage et de laisser au dernier comble un plus grand vide, pour comprendre que le dernier étage n'est, en rien, nécessaire au rehaussement. Et il ne sert pas plus de *buton* puisqu'à cet endroit, les chevrons écartent les éventuelles poussées du massif. Du coup, on imagine mal que les architectes aient fait hisser ces huit blocs à une telle altitude sans une bonne et vraie raison. Et par voie de conséquence, ils avaient sûrement une même raison de poser précisément ce seul étage sur appuis libres et même sur un libage de calcaire.

Pour en juger, supprimons-le et voyons quelle conséquence en résulte. Le seul effet apparaît immédiatement, qui réduit la charge pesant sur l'encastrement de l'étage des monolithes sous-jacents. Et du coup, les encastresments du troisième étage auraient ôté aux monolithes une bonne part de leur capacité d'amortisseur. On peut donc conclure, sans forcer la conjecture, que le dernier étage de monolithes avait pour principale, sinon unique, fonction de surcharger les abouts des monolithes du troisième étage, afin de leur conserver une bonne capacité de résistance au cisaillement.

Et il semblerait que les architectes aient bien eu une vision extrêmement claire du jeu de ce dispositif amortisseur. En effet, une telle vision pourrait justifier le choix des pierres d'appui des derniers étages. Celles du dernier étage sont en calcaire. C'est-à-dire qu'elles présentent une moindre résistance mécanique que le granit. Ensuite, les monolithes du troisième étage sont calés avec du calcaire, mais sur un libage de granit. Les architectes

n'auraient pas procédé autrement s'ils avaient voulu amoindrir progressivement la résistance mécanique des assises, permettant ainsi aux abouts des monolithes du troisième étage de demeurer bien encastres sans risque de dislocation des libages.

Conclusions

Revenons d'abord sur la question du vocabulaire descriptif. Déjà, plutôt que «chambres», «combles» convient parfaitement. Maintenant, cet énorme empilement n'ayant aucune fonction de décharge, pour le désigner correctement, il serait imprudent de lui donner soit la seule fonction de rehaussement, soit seulement celle d'amortisseur. Car, si les combles ont objectivement une fonction de rehausse, ce sont les étages de monolithes qui assument la fonction d'amortisseurs.

Par voie de conséquence, aux monolithes du dernier étage n'ayant qu'une fonction constructive de surcharge, qu'on pourrait appeler contrepoids, il semble préférable de conserver la désignation de monolithes pour ne pas compliquer inutilement.

En revanche, les trois autres étages de monolithes ayant objectivement assumé la fonction de contrer les jeux différentiels entre leurs appuis encastres, il serait réducteur de leur conserver la neutralité de monolithes. Mais on a vu qu'ils peuvent aussi avoir eu la fonction de *butons* contrant les effets de dévers des parois dans le projet de rehaussement des chevrons.

Dans la typologie classique de la construction, il n'existe aucun nom d'ouvrage ou de pièce de construction réunissant ces deux fonctions. Si les pièces servant à contenir des poussées dans les parois s'appellent *butons* ou entretoises, ce sont plutôt des pièces de bois ou métalliques provisoires. Les butons travaillent exclusivement en compression, tandis que les entretoises peuvent aussi travailler en traction. Mais il existe encore, en charpenterie, une autre pièce constructive, l'*entraît*. C'est une poutre de bois qui franchit le vide séparant deux éléments de charpente, les arbalétriers. Travaillant en traction, elle n'a d'autre fonction que d'empêcher les arbalétriers de s'écarter. Sous réserve de cette différence sur la nature du jeu en question (traction au lieu de cisaillement ou compression), le terme d'*entraît* pourrait mieux convenir que *buton* ou entretoise, ne serait-ce que par sa consonance, les monolithes se situant *entre* des parois dont ils doivent contrecarrer les jeux différentiels et poussées. Quoiqu'il en soit, on voit à nouveau combien il est difficile d'arrêter une désignation parfaitement adéquate par simple transposition et similitude.

Pour les différentes structures que nous avons évoquées ici, il apparaît donc qu'il serait structurellement correct d'employer les termes suivants :

- *poutres* et *plafond* pour la chambre du Roi ;
- *entraîts* pour les monolithes des trois étages intermédiaires ;
- *monolithes* pour le dernier étage ;
- *combles* pour les espaces séparant ces ouvrages, y compris des chevrons ;
- *rehausse* et *amortisseur* pour l'ensemble du dispositif superposé au plafond de la chambre ;
- *pyramide à degrés adossés* pour celles dont on est certain d'une macrostructure à *noyau* et *accrétions* ;
- *pyramide à degrés superposés* pour l'autre hypothèse de macrostructure à degrés sous le complément lisse, improprement dite à « mastabas superposés ».

Une fois proposé ce vocabulaire raisonné, il apparaît donc que l'empilement superposé à la chambre de Kheops a sûrement été mis en œuvre de façon, au moins, à rehausser le déport des descentes de charges, afin de ne pas affecter la grande galerie. Mais le surnombre des

étages, comme l'énormité des monolithes qui apparaît complètement disproportionnée, semblent exclure qu'ils aient seulement servi de *butons* pour contenir les poussées annexes sur les parois des combles.

Il apparaît donc que les architectes de Kheops avaient sans doute prévu et jaugé un risque important de jeu différentiel, qui a provoqué la fissuration des énormes monolithes de granit sans affecter la pérennité de la chambre. Mais peut-on dire avec certitude lequel des types de tassement différentiel les architectes ont voulu contrer par leur dispositif amortisseur ? En effet, comme il n'y a apparemment pas de « zone dure » au nord sous la chambre, la question demeure de savoir si une faiblesse pouvait être décelée au sud avant mise à exécution de la chambre, ou si cette faiblesse a été accidentelle, et donc qu'elle n'avait pas été prévue.

Dans le premier terme de l'alternative, les architectes n'avaient pas prévu de contrer un affaissement au sud, mais seulement une différence de descentes de charges au nord, du genre de celle que les ingénieurs d'EDF ont mise en évidence. Il s'agissait des conséquences du déport de la chambre dans l'hypothèse d'un massif pyramidal homogène. Du coup non seulement l'affaissement au sud n'aurait pas été prévu, mais il serait dû au hasard d'un défaut aléatoire dans le libage. Il s'en suivrait que le dispositif amortisseur aurait, par pur hasard, fonctionné à l'inverse de ce qui aurait été prévu. Mais on a dit combien était improbable un tel aléa dans la structure d'un libage courant, surtout aligné de façon homogène tout au long de la paroi sud.

Dans le second terme de l'alternative, les architectes auraient bel et bien prévu le risque d'affaissement au sud. Et ce risque aurait bien été prévisible dans le cas où le massif serait macrostructuré par noyau et accrétions, et si le plan de clivage entre la face sud du noyau et la première accrétion se trouvait justement passer dans la zone de la paroi sud. À l'énoncé de cette hypothèse, Gilles Dormion m'a écrit : « C'eut été d'une folle imprudence ! » Sans aucun doute. Mais il n'y aurait eu folle imprudence que si le projet de chambre avait été prévu *avant* la mise en œuvre de la macrostructure. Au contraire, si l'état d'avancement de la macrostructure et celui de grande galerie ne permettait plus de faire autrement, c'est tout justement cet état d'avancement, avec un plan de clivage déjà en place proche de la future paroi sud, qui expliquerait et justifierait l'énorme dispositif destiné à amortir un jeu différentiel devenu en effet, non seulement prévisible mais inévitable. Du coup, il n'y aurait là aucune folle imprudence de la part des constructeurs, bien au contraire. En revanche, la folie incomberait alors à un Kheops mégalomane, venant sans doute *imposer* à ses architectes cette nouvelle disposition à très haut risque. Et l'éventualité de cette intervention de Kheops semble confortée par la complexité assez énigmatique des chambres et couloirs, comme par la morphologie de nombreux détails inexplicables autrement. Car tous vont dans le même sens de modifications successives du projet, modifications qui ne peuvent être dues qu'à la volonté impérieuse de l'Horus. En l'occurrence, cette manie de modifier les projets en cours de chantier est un aléa courant qu'ont connu tous les architectes de l'histoire jusqu'à aujourd'hui, et ce d'autant que le maître d'ouvrage est puissant et que le chantier dure longtemps.

Quoi qu'il en soit, la réponse à notre question de départ est donc à la fois double et ambiguë :

- *Primo*, le dispositif a certainement été en partie prévu pour rehausser le déport de charges afin d'éviter d'affecter la grande galerie ;
- *Deuzio*, mais il a sans doute été également prévu pour servir d'amortisseur à un jeu différentiel entre les parois nord et sud de la chambre. Mais, avant d'avoir levé le doute sur la macrostructure interne de la pyramide, on ne peut pas dire formellement si le dispositif avait été prévu pour fonctionner dans un sens ou dans l'autre, c'est-à-dire si la localisation des désordres côté sud avait été anticipée ou s'ils sont dus au hasard.

Ultime question en l'état des données : par quelle méthode les architectes ont-ils pu décider de l'importance à donner au dispositif amortisseur ? Car ce type d'ouvrage n'avait aucun précédent, même embryonnaire. Les architectes n'ont donc pas pu appliquer la recette d'un modèle préétabli et transmis par la tradition. Ils ont ainsi montré une belle capacité d'innovation, en procédant sans aucun doute de façon purement empirique. On ne saura donc jamais comment ils ont choisi le nombre et les caractéristiques des éléments constitutifs de leur amortisseur.

Un dernier point pose enfin un autre type de question. Sans rien changer à l'ensemble, pourquoi les architectes n'ont-ils pas posé les poutres du plafond de la chambre du Roi sur appuis libres au lieu de les encastrer ? Car, s'il l'avait fait, le plafond serait demeuré intact. Seule conséquence, la dimension de la chambre étant sans doute intangible, il aurait alors fallu rallonger un peu les entrâits des étages (fig. 23).

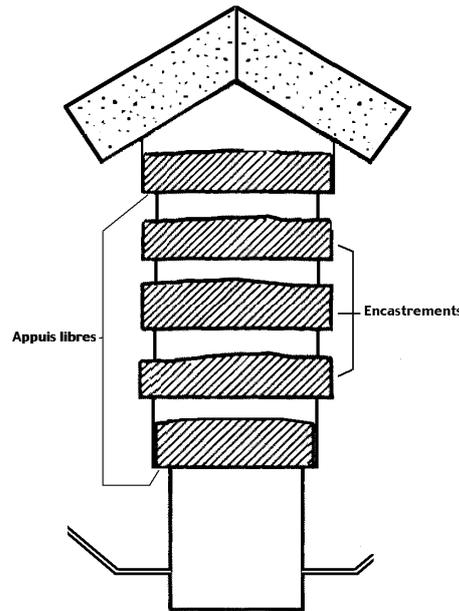


Figure 23 Proposition optimisée : libération du plafond de la chambre.

Attention ! Proposer de nos jours ce genre d'optimisation ne revient pas à minimiser le génie des architectes de Kheops³⁷, et n'enlève rien à leur exceptionnelle intuition constructive. Car, devant le côté titanesque de leur exploit, surtout au regard des moyens de l'époque, il serait pour le moins outrecuidant d'oser leur donner la moindre leçon *a posteriori*. Comme ils ne disposaient d'aucun de nos attendus théoriques ni de nos moyens de calcul ou de simulation, le génie de leur intuition technique n'en apparaît que plus éclatant. En effet, l'acquisition de compétence, du haut en bas de la hiérarchie du projet comme du chantier, relevait exclusivement d'une initiation par apprentissage de modèles et de gestes. Et, contrairement à nous, la justification des gestes, comme la théorisation des modèles, fonctionnaient de façon symbolique, par révélation et au moyen de rituels. Car il ne faut surtout pas séparer, comme nous le faisons depuis la Grèce, leur vision, à la fois conceptuelle et pratique, de la dimension religieuse et magique omniprésente à l'époque. Ce bain sous-tendait tous les aspects du projet comme du chantier, même ceux qui paraissent strictement techniques à nos modernes yeux laïcs. Ces architectes étant également grands prêtres, devaient assurer, au prix le plus élevé du principe de précaution, la pérennité d'une chambre monumentale qui matérialisait et assumait symboliquement la survie de l'Horus dans l'éternité, donc garantissait celle de l'Égypte dans les siècles des siècles. >>>

1 Ce mot ayant été banalisé par les outrances du langage courant, est ici employé au sens strict de « hors de l'ordinaire », de même que « énorme » sera employé dans son sens de « hors norme ».

2 À l'exception toutefois des chambres creusées dans le roc, comme la chambre souterraine de Kheops, mais aussi celles de Djéser, de Sekhem-ket et de Kaba.

3 On préférera l'orthographe « granit » à « granite ». C'est à Victor Hugo (cf. Littré) qu'on doit la première adjonction du « e », selon le mode anglo-saxon, peut-être à cause de son exil à Guernesey. Et cette orthographe s'est installée, sans doute du fait que les géologues, archéologues et égyptologues doivent faire leurs communications en anglais.

4 Curieusement, selon les représentations, on en compte 34 ou 35.

5 *Annales du symposium* d'Athènes, A.A Balkema, Rotterdam, Bookfield, 1988 (ISBN 906191 793X). Ces annales exposent en fait les résultats de trois études. La première (vol. 1, pp. 559 à 565), sous les signatures de P. Delétie et J. Monluçon, est une étude géomécanique de la chambre du roi (qui s'était soldée par un résultat mitigé). La seconde, une recherche de cavité dans le bloc central par microgravimétrie (échec de l'opération et échec médiatique qui s'est soldé par l'abandon du projet « Khéops » sous mécénat de CPGF et EDF, alors que les autorités égyptiennes demandaient de poursuivre sur toute la pyramide), est rapidement relatée dans le compte-rendu du symposium d'Athènes (p. 1063-1069). Après l'abandon de l'opération « Khéops », la troisième étude, sous les signatures de H. D. Bui, J. Montluçon, J. Lakshmanan, J.C. Erling et C. Nakhla, a été réalisée hors mécénat de CPGF et d'EDF. Cette étude a d'abord exploité les mesures déjà réalisées lors des deux premières. Mais H. D. Bui a dû mettre au point, avec J. Lakshmanan, une nouvelle méthode d'inversion microgravimétrique. Enfin une autre étude géomécanique, menée plus récemment et complètement indépendamment, par Dassault Systèmes, dans le cadre d'un mécénat dont J-P. Houdin a bénéficié, a simplement confirmé les travaux de J. Kérisel (1991).

6 Par exemple, Marogioglio e Rinaldi n'ont pas relevé les fissurations des monolithes.

7 C'est la réaction de Gilles Dormion. Il faut préciser que cette discussion sémantique ne concerne pas les désignations telles que « chambre de la Reine », « chambre du Roi », « conduits de

ventilation » et autres qui, bien qu'inexactes, n'engendrent pas le genre de confusion technique qui perdure dans la perception des problèmes examinés ici, en polluant de qui pro quo toute discussion technique méthodique.

8 On peut décomposer un édifice en trois grands niveaux de structures : celles qu'on appelle les nanostructures que sont les matériaux ; les microstructures que sont les éléments constructifs (poteaux, piliers, poutres, linteaux, arcs, voûtes, planchers, etc.) ; et les macrostructures qui sont des ensembles cohérents de microstructures composées selon des principes (la coupole byzantine, la nef gothique, la voûte romane ou le pont suspendu, par exemple).

9 Rappelons qu'au contraire de l'acception commune, strictement, une « pagode » ne désigne pas un temple, mais une espèce de tour signal qui peut d'ailleurs ne pas être liée directement à un temple.

10 Le groupe d'Athènes donne de « 2 à 3 mètres », ce qui est inexact.

11 Un *buton* est un étau horizontal entre parois, destiné à contenir des poussées horizontales, c'est-à-dire qu'il travaille en compression.

12 Cette fonction est communément donnée aux conduits, mais ce n'est sûrement pas la bonne qui reste encore à découvrir.

13 Autre exemple de vocabulaire : le groupe d'Athènes emploie le terme « tympan » pour désigner tous les pignons intérieurs. Or, un tympan est un élément d'architecture extérieur, très spécifique (fronton des temples antiques, remplissage des arcs romains, romans, gothiques puis classiques, notamment au-dessus de portes), qui ne correspond pas du tout aux pignons de la chambre ni à ceux des combles, sauf, par approximation, aux pignons du comble sous chevrons, du fait de leur forme triangulaire. Mais, strictement, un tympan n'est qu'un remplissage, ce qui n'est pas le cas ici.

14 La différence entre « fissure » et « fracture » s'établit selon l'écartement apparent d'une rupture constatée dans un matériau. D'une façon générale, on passe d'une fissure à une fracture, lorsqu'une rupture est traversante et permet de désolidariser les parties d'ouvrage situées de part et d'autre.

15 Les dommages affectant une large zone de la paroi, ne peuvent pas être attribués à ce tâtonnement et résultent sans doute des divers dégâts occasionnés par les chercheurs de trésor au cours des âges.

16 Une inscription située dans le premier comble, indique «17^e compte de Khoufou». Cette date pourrait concerner les réparations plutôt que la mise en œuvre du monolithe sur lequel elle est peinte. En effet, comme un «compte» représentait les deux années séparant chaque recensement, il peut s'agir d'une période située dans les 33^e ou 34^e années du règne, donc beaucoup trop tardive pour dater la mise en œuvre du monolithe concerné. Par ailleurs, l'accès au premier comble (en A sur la **fig. 1**) a été signalé dès 1785 par Davison, et faussement interprété alors comme un «chemin de voleurs». Le fait que les constructeurs de la pyramide n'aient pas poussé leurs investigations vers les autres combles, comme l'ont ensuite fait les premiers fouilleurs européens, tendrait à prouver que la sous-face du second étage de monolithes était encore intacte. Ce qui veut dire que le désordre a évolué.

17 Les ingénieurs d'EDF considèrent que la fissuration des monolithes est due à un effort de «traction», ce qui ne manque pas de poser question. En effet, aucun effort de traction ne peut s'appliquer ici aux monolithes. Et, si tel avait été le cas, les efforts de traction étant horizontaux, les monolithes seraient seulement sortis de leurs encastrement et, s'il y avait eu des fissurations, elles se seraient produites avec des configurations différentes et surtout de façon aléatoires. Or il est évident que ce cas de figure ne correspond pas à l'état des lieux. De plus, sur le plan théorique, il n'y a rien de commun entre traction et cisaillement.

18 Au sens du principe d'objectivité de la méthode scientifique.

19 Bien sûr, rien à voir avec la foudre. Cette expression est employée par les tunneliers pour désigner ce qui se passe dans les parois de tunnels ou cavités creusées à grande profondeur dans des roches compactes ou stratifiées. Sous la compression interne du massif, au lieu d'éboulements on assiste à de véritables explosions des parois.

20 Notamment par Pierre Crozat et Jean-Pierre Houdin, y compris moi-même, hélas, sans vérification de source.

21 Si les espacements entre les vingt-six rangs d'encoches dans les parois latérales de la grande galerie, correspondent à des traverses de bois devant servir à maintenir en attente autant de blocs bouchons, la somme des longueurs de ces blocs correspond à la longueur du couloir ascendant.

22 Pour couvrir la largeur du caniveau central plus ses deux banquettes, le tout en forte pente, il apparaît que la solution technique la plus simple était une couverture rampante en encorbellements telle qu'elle a été réalisée. L'exceptionnelle qualité architecturale apparaît donc comme le résultat d'un choix technique, et non comme une volonté esthétique a priori.

23 Sinon, comment se justifierait l'engravure qui la saigne sur toute sa longueur? En effet, affectant des parois déjà parfaitement ravalées, elle a été laissée brute de repiquage. Au passage, ceux qui y voient une sorte de guide pour un appareil de charroi, n'ont jamais testé mécaniquement pareille configuration. Comment peuvent-ils croire qu'une saignée aussi grossièrement taillée pourrait permettre le moindre glissement d'une pièce de bois?

24 L'argument selon lequel cette nouvelle chambre aurait alors surchargé les chevrons de la Reine ne tient pas. Car, au contraire, ceux-ci auraient été déchargés, puisque les chevrons du Roi auraient supporté et dévié toutes les descentes de charges. Les chevrons de la Reine n'auraient plus supporté que les descentes de charges de la seule masse jusqu'au dallage de la chambre du Roi.

25 On fera ainsi une différence fondamentale avec «gradin» que représente chaque marche des faces de la pyramide privée de son parement final.

26 La plupart de ceux à partir de la IV^e dynastie, dont ceux de Radjédef à Abou Rawach où j'ai mené une expertise structurale à la demande de Michel Baud.

27 Celles des empires suivants sont en brique et macrostructurées de façon complètement différente.

28 La contre-pente du déversement est perpendiculaire à l'inclinaison des faces. C'est aussi le cas au moins du parement du tronçon inférieur de la Rhomboïdale.

29 L'escalier mène l'âme de l'Horus vers l'empyrée de dieux, ses pères (textes dits «des pyramides» qu'on retrouve gravés dans onze pyramides des V^e et VI^e dynasties, reprenant des textes plus anciens sur papyrus qui sont perdus). La pyramide lisse correspondrait à l'enveloppement de l'escalier sous la protection des rayons de Rê, mais, même assez généralement admise, ce n'est là qu'une hypothèse.

30 Sans chambre, orientées de façon variable, on ignore tout de leur fonction.

31 Laissons de côté la pyramide d'Abou-Rawash, bâtie par Radjédef, sans doute située entre Kheops et Khephren, dont l'état de ruine ne permet guère d'induire la structure.

32 Il ne manque que le parement sauf sur le quart de la hauteur où il est en granit non ravalé.

33 Sauf au moins Michel Baud, et de façon certaine pour ceux de Radjédef à Abou Rawach, que j'ai étudié avec lui sur place. Mais le Mastaba Faraou de Chepseskaf au sud de Saqqarah (d'après Jéquier et Lauer) est également structuré de la sorte.

34 On l'a dit, le fait qu'on ne voit pas transparaître de joint de clivage dans les pignons des combles peut provenir du fait que ces pignons ont été montés en parois indépendantes exactement comme dans la chambre. Le plan de clivage se trouverait donc masqué derrière les parois.

35 Gilles Dormion pense que je n'ai «pas le droit» de faire cette hypothèse! Mais, à ma connaissance, aucun sondage n'a établi que les pignons étaient les faces apparentes solidaires du libage du massif.

36 En fait, il a repris l'inclinaison interne de Djéser. Mais, déjà à Méidoum, elle a été très raidie et encore plus chez Mykérinos.

37 On en connaît trois, Hémyounou, Ankhaf et Khoufou-ankh, tous très proches parents de Kheops. Les bustes deux premiers se trouvent respectivement à Hildesheim et Boston, tandis que le musée du Caire conserve le magnifique sarcophage du troisième.