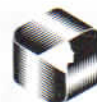


**id****CNISF****CONSEIL NATIONAL DES  
INGENIEURS ET DES  
SCIENTIFIQUES DE FRANCE****EDITORIAL****A PROPOS DE LA 13<sup>e</sup> ENQUÊTE****N° 62 - nouvelle série - 30 F  
Octobre 1999****SOMMAIRE****La 13<sup>e</sup> enquête sur la  
rémunération des Ingénieurs****CLAUDE ABET - (p. 2 & 3)****Recueil des bonnes pratiques à  
l'usage des associations****PAUL ALLARD - (p. 4)****Les dépêches (p. I à IV)****La construction des pyramides****HENRI HOUDIN - (p. 5 & 6)****La FMOI****PIERRE EDOUARD DE BOIGNE - (p. 7)****On parle ... - (p. 8)**

Le CNISF a présenté les résultats de la 13<sup>e</sup> enquête "Rémunération des ingénieurs" au public à l'occasion d'une conférence de presse organisée au Palais de la Découverte le mardi 21 septembre. Nous avons été heureux de constater que cette présentation avait attiré un public nombreux et diversifié, comportant, notamment, des représentants des entreprises.

Vous pourrez lire dans les pages jointes les principaux enseignements que l'on peut tirer de cette enquête.

Il est utile de rappeler qu'en agissant ainsi, nous avons conscience d'être confronté à la difficulté de relever un triple défi :

- ① Vérifier auprès de nos adhérents que cette enquête répondait toujours à un besoin.
- ② Faire paraître notre étude à point nommé pour les employeurs
- ③ Proposer un outil de travail utile à la profession.

L'accueil que nous ont réservé les participants à cette présentation nous laisse penser que nous avons probablement réussi. Loin de nous, cependant d'afficher un quelconque triomphalisme.

En ce qui concerne le premier point, nous avons à travailler ensemble pour analyser les qualités et les défauts de cette étude et pour prendre les bonnes décisions pour une future enquête, si la demande des associations se confirme bien dans ce sens. Nous sommes en effet conscients du travail que cela représente pour les associations : envoi de l'enquête aux membres, vérification des questionnaires remplis avant l'envoi vers l'organisme de saisie et gestion des commandes du document final. Nous constatons, cependant, que plus de 3000 ingénieurs (12% des répondants) ont commandé l'enquête en souscription, ce qui peut être interprété comme une réponse qui reste favorable à la poursuite de cette étude. Par ailleurs, nous devons prendre en compte les vertus de la continuité de cette enquête que la FASFID a commencé il y a plus de 40 ans et qui constitue un élément exceptionnel d'observation de l'évolution de la profession. Nous constatons, enfin, que les techniques évoluent et que la méthode traditionnelle que nous utilisons pour recueillir les données doit être analysée à la lumière de ces évolutions. Une réflexion est donc en cours dès maintenant pour effectuer l'analyse critique du travail effectué et pour faire des propositions pour les années futures. Nous vous tiendrons au courant.

Les résultats des précédentes enquêtes paraissaient un an après le recueil des données auprès des ingénieurs, ce délai a été ramené à un peu plus de 6 mois avec l'objectif de fournir aux employeurs un outil de travail actualisé mis à leur disposition au moment où les réflexions sur les politiques salariales pour l'année suivante sont en cours. Cela a nécessité pour le CNISF et les organismes qui ont participé à l'élaboration et à la rédaction du document final (CEFI, INSEE, LEST) une nouvelle organisation de leur travail, mais le défi a été relevé, pour, nous l'espérons, la plus grande satisfaction de nos interlocuteurs.

La présentation de l'enquête s'est faite avec la participation de représentants de la profession, un DRH et deux "chasseurs de têtes" qui ont, chacun dans leur domaine, commenté l'étude et apporté un éclairage sur leurs préoccupations. En les écoutant, nous avons pu constater que cette enquête avait su répondre à une partie de leurs questions et qu'elle pouvait être considérée comme une référence à la disposition de tous les responsables. L'effort fait pour intéresser des personnes extérieures à nos associations a visiblement porté ses fruits et nous ne pouvons qu'en être satisfait.

Il faut enfin rappeler que cette étude n'a pu être effectuée que grâce au travail de plusieurs équipes qui ont droit à nos vifs remerciements, qu'il s'agisse de l'équipe de CLAUDE ABET, Président de la commission enquête, de CHANTAL DARSCH du CEFI, de SÉBASTIEN ROUX de l'INSEE de BERNARD DUQUENNOY du LEST et de CATHERINE MARTIN, maquettiste. Grâce à leur bonne volonté et à leur professionnalisme, la 13<sup>e</sup> enquête a pu voir le jour à la date prévue, le CNISF se doit de leur exprimer toute sa gratitude.

**PAUL ALLARD**

Revue publiée par le Conseil National des  
Ingénieurs et des Scientifiques de France -  
7, rue Lamennais - 75008 Paris  
Tél. 01 44 13 66 88 - Fax 01 42 89 82 50  
E-mail : cnisf.allard.paul@wanadoo.fr  
Internet : <http://www.cnisf.org>

Directeur de la Publication : Daniel Arneline  
Rédacteur en chef : Paul Allard  
Réalisation PAO : Valérie Leclercq

Abonnement annuel : 200 F  
Abonnement membres du CNISF : 145 F

La reproduction des articles et informations parus dans cette revue est autorisée, sans droits, dans les revues des associations membres du CNISF, avec mention d'origine.  
CPPAP 65635



# LA CONSTRUCTION DES PYRAMIDES

HENRI HOUDIN

Ingénieurs des Arts & Métiers (Paris 1941)

Membre de la Commission du Génie Civil CNISF

Jean-Pierre HOUDIN Architecte DPLG (Paris 1976)

Depuis la relation de son voyage en Egypte par Hérodote vers 650 av. JC, 2.000 après l'événement, d'innombrables publications ont traité des questions relatives aux pyramides. <sup>④</sup>Aucun texte gravé ou écrit, aucun dessin, aucun indice ne permet de dire laquelle des trois méthodes préconisées est la plus probable.

La thèse rapportée par Hérodote parle de machines de bois permettant d'élever les blocs de gradin en gradin.

Plus généralement sont proposées les solutions de rampes :

✓ celle perpendiculaire à une face de la pyramide dite frontale. En fonction de la pente de la rampe, de celle des talus, de la largeur de la voie de circulation, le volume du remblai à apporter puis à évacuer peut aller, pour certains auteurs, jusqu'à 3 fois celui de la construction elle-même !

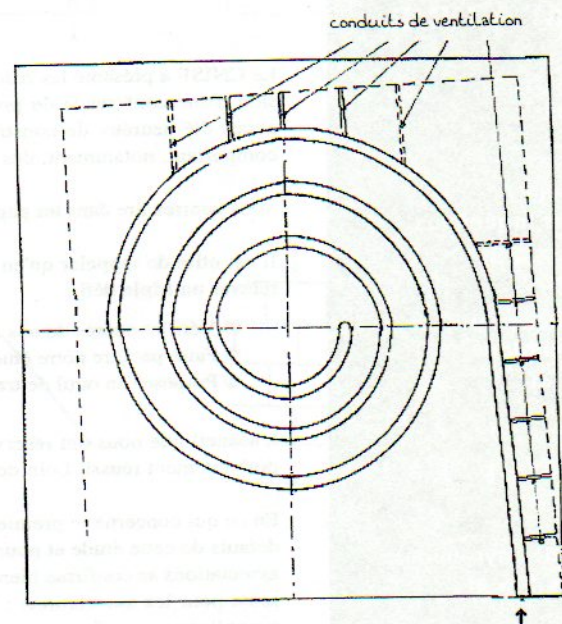
✓ celle d'une rampe hélicoïdale enveloppant la pyramide et constituée de briques de terre séchée. Elle recèle des défauts majeurs : le risque de glissement de sections de la rampe et la difficulté de tourner le convoi au passage de chaque arête. Elle implique surtout que les gradins restent apparents jusqu'à l'achèvement et que le revêtement en pierre dure soit posé en partant du haut, ce qui est une aberration en maçonnerie.

Pour essayer d'apporter une solution plus satisfaisante, plaçons nous à l'époque actuelle et imaginons comment serait traité le problème par une entreprise de Génie civil répondant à un appel d'offre pour l'édification d'une réplique de la pyramide de Khéops. L'adjudicataire du lot "levage et mise en place des matériaux", présentant le prix le plus compétitif sera, sans aucun doute, celui qui emploiera le matériel le plus puissant utilisé pour la construction des grands barrages en enrochements : bulldozers, dumpers, grues mobiles.

Les pierres de parement, les blocs calibrés et le tout-venant sont approvisionnés au pied du chantier par le titulaire d'un autre lot. Après le réglage de niveau de l'embase, commence la pose de la première rangée de pierres de parement et des blocs formant le périmètre extérieur, en réservant deux portes pour l'entrée et la sortie des engins. A partir de celles-ci une rampe est constituée dans les matériaux de remplissage. La construction se poursuit, suivant le même processus, niveau par niveau, en allongeant les voies de circulation jusqu'à ce qu'il soit nécessaire de les couvrir, les talus qui bordent ces voies devenant trop importants.

Ainsi apparaît la méthode de construction utilisant un tunnel hélicoïdal réservé (et non creusé) lors du remplissage du corps de la pyramide (fig. 1). Une sorte de tunnelier formant coffrage, permet le bétonnage des parois du tunnel.

Rampe Interne Hélicoïdale - Fig. 1



L'ossature et le mécanisme d'avancement sont externes et réservent le gabarit de circulation. L'ouvrage routier créé est accessible à tous les engins de travaux publics. L'élévation se poursuit jusqu'à un niveau proche du sommet où est installée une plate-forme de travail permettant l'achèvement par les moyens classiques. A 40 mètres du sommet il ne manque plus que 46.500 m<sup>3</sup>, soit à peine 1,8% du volume global de 2,6 millions de m<sup>3</sup>. La construction de la pyramide est réalisée sans l'apport d'un seul mètre cube de remblai inutile.

A partir de cet exercice d'école, retournons 4600 ans en arrière pour essayer de comprendre comment ont opéré les contemporains de Khéops, avec les moyens dont ils disposaient à l'époque : une profusion de main d'œuvre (100.000 hommes), du temps (20 ans), peu de matériel pour les transports terrestres : des leviers, des rouleaux et surtout des traîneaux à attelage humain.

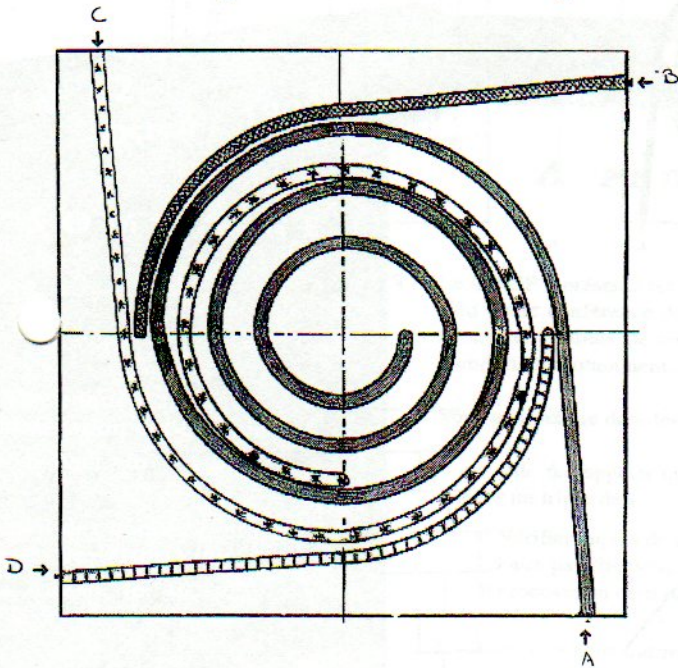
Le professeur Jean Kérisel a calculé les capacités de transport de ces convois. Les formules de la Mécanique des sols définissent les propriétés lubrifiantes du limon du Nil. L'étude du rachis humain donne la force maximum de traction d'un haleur, en régime continu. Le



résultat global est qu'il faut 10 hommes pour tirer 1 tonne sur une rampe à 8% à la vitesse de 0,30 m/s soit 1,1 km/h.

L'utilisation du système de rampe hélicoïdale (fig.2) est tout à fait adapté à ce type de transport. La réalisation du radier et des piedroits avec des blocs taillés ne présente aucune difficulté pour l'époque ainsi que le prouvent les couloirs et conduits explorés. En supposant la couverture en plein cintre on obtient une galerie comparable à un couloir de métro.

Réseau de galeries hélicoïdales - Fig.2



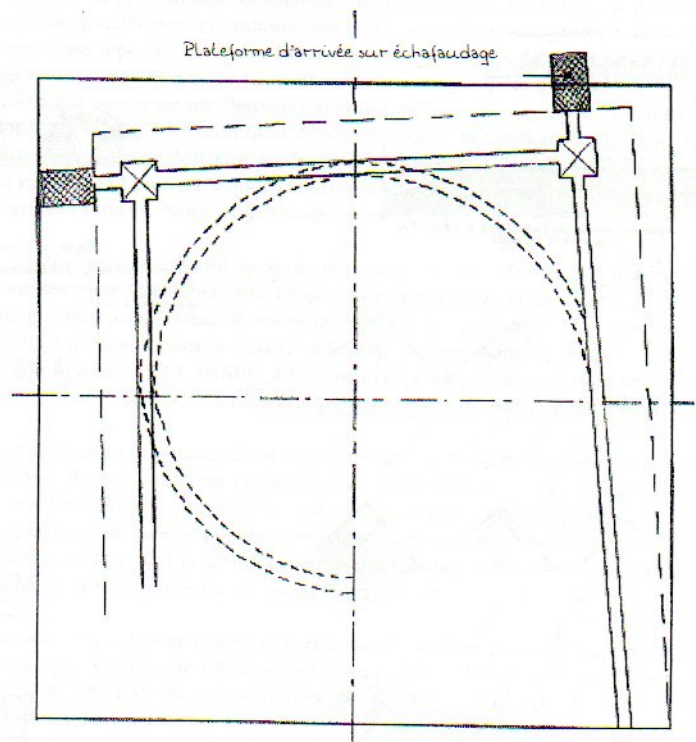
Cette solution ne présente que des avantages : pas un mètre cube de remblai à faire provisoirement puis à évacuer, halage des traîneaux à l'abri du soleil et des intempéries, donc pas de risque de déshydratation du limon lubrifiant et moins de fatigue pour les hommes travaillant à température constante et agréable. La ventilation est faite par tirage naturel du tunnel formant cheminée et par des conduits d'aération situés dans les secteurs proches des faces. Comme l'éclairage de la galerie par des torches est nécessaire, on peut travailler en continu. Toutefois des réserves apparaissent à la réflexion. Le convoi constitué d'un traîneau tiré par 20 haleurs, transportant une charge de 2 T, mesure 15 m de longueur. Il est rectiligne par suite de la traction exercée sur les cordages et s'inscrit mal dans une voie circulaire. Ceci oblige à prévoir une saignée de guidage et des équipes de pousseurs latéraux pour réduire le frottement tangentiel. Une autre solution s'impose : la rampe droite à quart tournant (fig. 3). Chaque volée est à égale distance de la face et débouche sur la paroi perpendiculaire. Une plate-forme est aménagée à l'angle pour le pivotement du traîneau. L'attelage humain se disloque et se reforme aisément dans la galerie perpendiculaire. Une équipe spéciale fait pivoter le traîneau à l'aide de leviers. Pendant ce temps les haleurs se reposent. La galerie rectiligne est plus étroite et la charge de maçonnerie la surmontant est faible, ce qui permet de réaliser sa couver-

ture par des blocs en encorbellement comme cela était de pratique courante. Tous les orifices inutiles étant systématiquement rebouchés, il faut penser que les galeries sont remplies à la fin de leur utilisation, en descendant, les matériaux étant livrés par les traîneaux près du front de travail puis transportés manuellement. Leur nature étant identique à ceux du corps de l'ouvrage il serait difficile de prouver la présence de telles galeries par de simples forages de reconnaissance et de localiser la séparation entre les parois de la galerie et son remplissage. Seuls les spécialistes seraient en mesure de dire si, au cours de leurs explorations des diverses cavités, ils auraient constaté dans les parois des anomalies encore inexpliquées,\* des galeries de construction rebouchées.

La novation se résume ainsi : LA RAMPE EST À L'INTERIEUR ou plus précisément il faut dire que les matériaux sont élevés à leur emplacement définitif par des convois de traîneaux circulant dans un réseau de galeries internes. A partir de ce postulat de rampe située à l'intérieur, d'autres dispositions que celles évoquées précédemment peuvent être imaginées. Des éléments de grande dimension sont utilisés dans le corps de l'ouvrage et ne peuvent emprunter les galeries. Il faut alors admettre que ces pièces lourdes et notamment le pyramidon sont disposés, dès le début des travaux, à l'intérieur du périmètre de base et qu'elles sont ensuite élevées au fur et à mesure de l'avancement des travaux à l'aide de leviers et de calages comme certains auteurs imaginent qu'a été réalisé l'ensemble de la pyramide.

L'absence curieuse, dans les textes et gravures de l'époque, de toute référence à l'usage improbable de rampe extérieure permet-elle de démontrer la validité du procédé décrit dans ce texte ? Pourquoi les architectes auraient-ils éprouvé la nécessité de décrire une méthode de travail par l'intérieur qui leur était aussi naturelle ?

Rampe droite à quart tournant - Fig.3



\* qui pourraient résulter du croisement de ces cavités avec