

MAT Article 2 Page

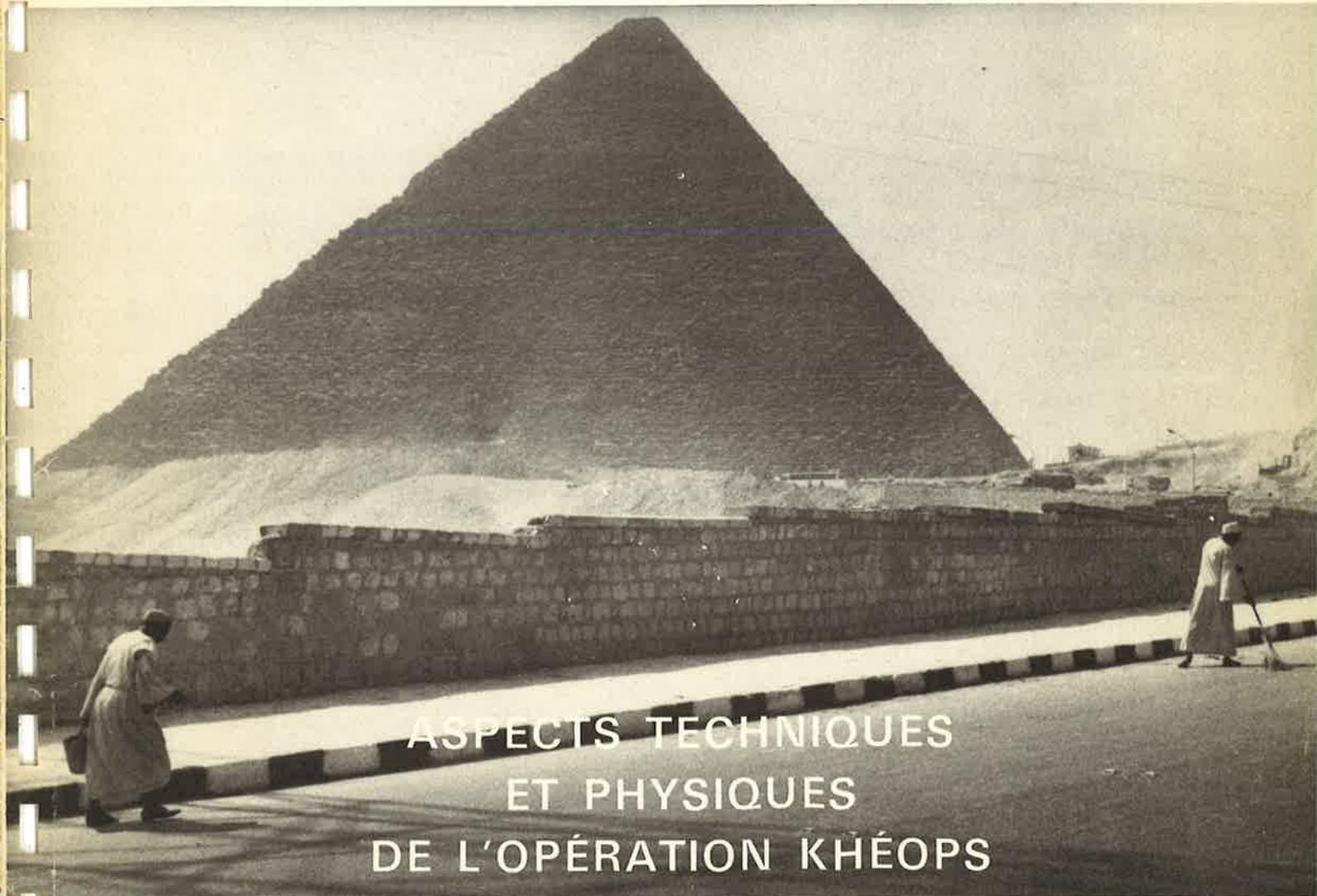
ANNALES

DE L'INSTITUT TECHNIQUE
DU BATIMENT
ET DES TRAVAUX PUBLICS

N° 454 - MAI 1987

SÉRIE : ARCHITECTURE ET URBANISME 72

SÉANCE DU 23 OCTOBRE 1986



FÉDÉRATION NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS
SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE
INSTITUT TECHNIQUE DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

INTRODUCTION

Le 23 octobre 1986, s'est tenue en la salle des Ingénieurs et Scientifiques de France (I.S.F.) 19, rue Blanche, à Paris, une séance d'étude sur le thème :

ASPECTS TECHNIQUES ET PHYSIQUES DE L'OPÉRATION KHÉOPS

Cette séance était présidée par :

M. Jean KERISEL, Ingénieur conseil, ancien Président des I.S.F., Directeur Général honoraire de la Reconstruction, ancien Président de la Société Internationale de Mécanique des Sols et Travaux de fondation, et en présence des invités de marque suivants :

- **M. Claude BIENVENU**, Directeur des Études et Recherches, Électricité de France,
- **M. Rémy CARLE**, Directeur de l'Équipement, Électricité de France,
- **M. Philippe GUILLEMIN**, Sous-Directeur des Sciences Sociales et Humaines, Ministère des Affaires Étrangères,
- **M. Jean-Louis GIRAL**, Président de la Fédération Nationale des Travaux Publics.

Ont pris la parole, successivement :

- **M. Jacques MONTLUÇON**, ancien élève de l'École Polytechnique, chargé de mission à la Direction des Recherches d'Électricité de France,
- **M. Jacques LAKSHMANAN**, Ingénieur géologue E.N.S.G., Directeur Général de la Compagnie de Prospection Géophysique Française, parlant en son nom et en celui de **M. Jean-Claude ERLING**, Ingénieur géophysicien, Chef de la section gravimétrie à la Compagnie de Prospection Géophysique Française,
- **M. Yves LEMOINE**, Ingénieur géologue E.N.S.G., Directeur adjoint de C.P.G.F.,
- **M. Pierre DELETIE**, Ingénieur géologue E.N.S.G. à la Direction de l'Équipement d'Électricité de France.

En couverture : Vue générale de la pyramide de Khéops.

ALLOCUTION du PRÉSIDENT

L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics et l'Hôtel des Ingénieurs et Scientifiques de France sont particulièrement honorés d'accueillir une assistance aussi nombreuse. J'ai d'abord plaisir à saluer sur cette estrade, la présence de M. BIENVENU, Directeur des Études et Recherches à E.D.F., de M. CARLE, Directeur de l'Équipement à E.D.F., de M. GUILLEMIN, Sous-Directeur des Sciences Sociales et Humaines au Ministère des Affaires Étrangères, et de M. GIRAL, Président de la Fédération Nationale des Travaux Publics. Dans la salle, j'aperçois des personnalités de tous horizons : égyptologues, architectes, historiens, géographes, ingénieurs de disciplines très variées, représentants de la presse. Qu'ils m'excusent de ne pas tous les nommer. Leur présence me permet de souligner l'attrait qu'exerce, à 45 siècles de distance, la pyramide de Khéops, et ceci en dépit de la sévérité du titre de cette conférence. Il s'agit en effet aujourd'hui, en principal, de l'application d'une technique de pointe, la microgravimétrie, à la connaissance de la structure interne de la pyramide de Khéops. Application faite conjointement par E.D.F. et la C.P.G.F. sur la demande du Comité des Antiquités Égyptiennes au Caire.

Cette intervention dans un domaine archéologique, a pu paraître surprenante à certains. Ce serait alors méconnaître l'évolution de l'archéologie qui a largement prouvé, ces derniers temps, qu'elle se veut de plus en plus scientifique. Les égyptologues, j'en ai la conviction, restent ouverts à ce genre d'approche. Tel est en tous cas le point de vue que m'a exprimé l'un de nos meilleurs égyptologues français, M. LECLANT, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Inscriptions et Belles Lettres, qui, retenu par les devoirs de sa charge, a délégué à cette conférence M. J.-Ph. LAUER que j'ai plaisir à saluer, tout comme Madame DESROCHES NOBLECOURT bien connue de vous par ses conférences sur l'Égypte, et M. Salah EL NAGGAR, égyptologue du Service des Antiquités Égyptiennes.

Il ne s'agit d'ailleurs pas là, en ce qui concerne l'approche scientifique des structures pyramidales, d'un fait isolé, et ne serait-ce que pour mieux vous faire saisir l'intérêt de l'exposé de M. LAKSHMANAN, je voudrais vous dire quelques mots de la pyramide de Meidoum, l'aînée de Khéops d'un siècle environ. Pyramide à forme étrange aujourd'hui (fig. 1) qui fut pyramide à gradins, puis pyramide vraie (fig. 2 à gauche). À l'inverse de celle de Khéops, sa structure interne est parfaitement connue : elle comporte 9 murs stabilisateurs espacés de 10 coudées (5,20 m) en blocs de calcaire compact, bien assisés. Le mur n° 6 est aujourd'hui à nu sur 32 m de haut, la moitié de la hauteur de la pyramide (fig. 2 à droite). L'application de procédés classiques en mécanique des roches et sols : microscopie optique, analyse au spectromètre, etc..., ont mis en relief la médiocrité à la fois des pierres et mortiers utilisés par Snefrou dans la transformation en pyramide vraie, à telle enseigne qu'une fois pillée la carapace en calcaire compact de Tura, un glissement tel que celui que je propose ici paraît pouvoir expliquer l'étrange forme actuelle (fig. 3). Encore dans l'optique de la conférence de M. Lakshmanan, je précise que les calcaires compacts de Tura ont 2,6 de densité et les médiocres pierres dont je viens de parler, moins de 2,1, deux chiffres qui sont presque aux deux extrémités de l'échelle de densité des pierres.



Fig. 1. — Meidoum en 1986.
Vue du N.E.

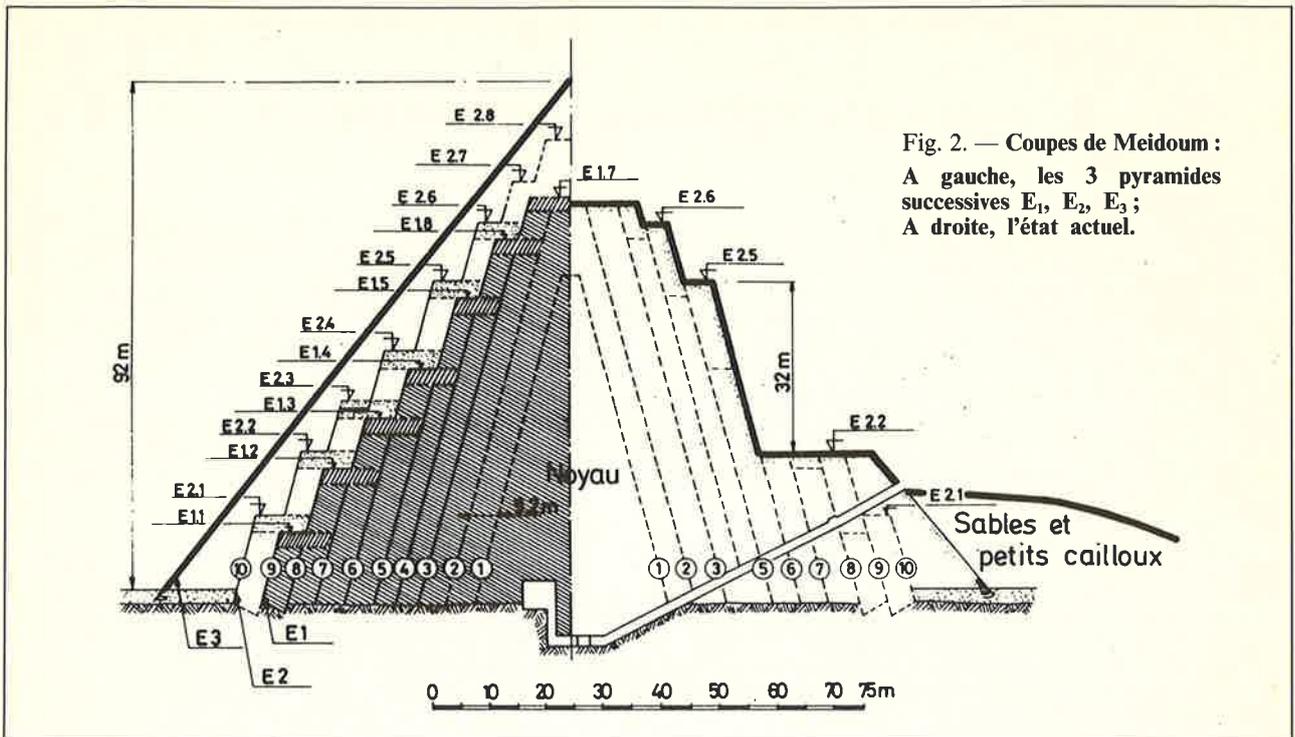


Fig. 2. — Coupes de Meidoum :
A gauche, les 3 pyramides
successives E₁, E₂, E₃;
A droite, l'état actuel.

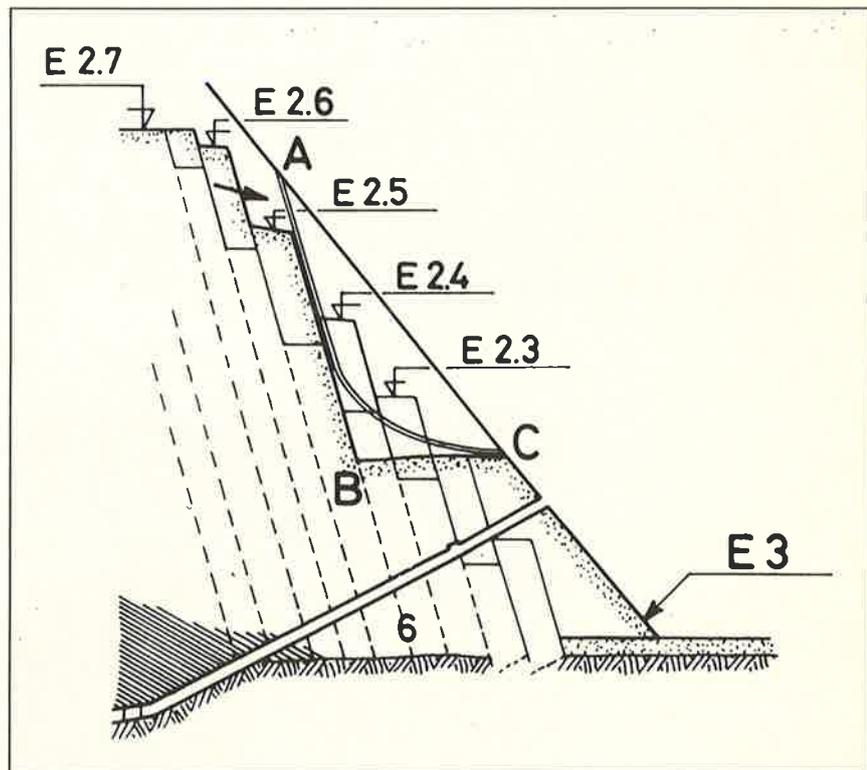


Fig. 3. — Glissement probable dans les matériaux médiocres superposés à E₂.

Pour terminer, un tout petit rappel historique. La figure 4 représente la coupe des 7 pyramides en pierre érigées pendant un siècle et demi, de — 2 750 à — 2 600 environ. Khéops est deux fois exceptionnelle par le doublement de la hauteur avec par conséquent l'octuplement de la masse, et d'autre part, par le caractère spacieux des chambres funéraires et leur intégration en pleine masse de la pyramide.

Je passe la parole à M. MONTLUÇON, ancien élève de l'École Polytechnique, Docteur ès sciences, chargé de mission à la Direction des Études et Recherches d'E.D.F. qui va vous dire dans quelles conditions est née et s'est développée l'opération Khéops.

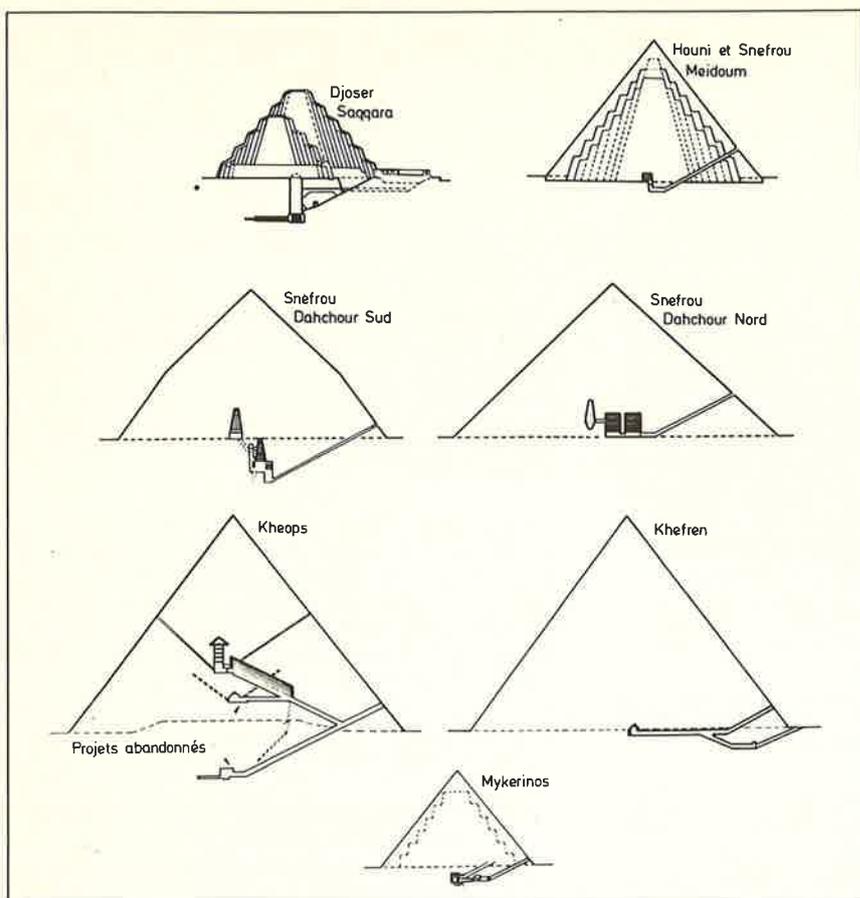


Fig. 4. — Coupe des pyramides principales.

PRÉSENTATION de l'OPÉRATION KHÉOPS

par Jacques MONTLUÇON

Permettez-moi, M. le Président, de commencer par regretter l'absence, dans la salle, de deux architectes MM. Jean-Patrice GOIDIN et Gilles DORMION (1). Ils sont à l'origine de toute cette opération et sans leur opiniâtreté, nous ne serions pas réunis ici ce soir.

Cette opération a commencé, du moins en ce qui me concerne, d'une façon un peu étrange : au printemps dernier, M. Denis LOUCHE, alors attaché culturel auprès de l'Ambassade de France au Caire, m'a posé la question suivante : « Y a-t-il dans la panoplie des outils d'E.D.F. un moyen qui permette de détecter des cavités dans la pyramide de Khéops ? »

La question avait de quoi surprendre mais le problème était excitant. En outre, depuis quelques années, E.D.F. cherche à pratiquer une politique de Mécénat technologique en mettant ses moyens techniques et ses connaissances au service de projets culturels. N'y avait-il pas moyen de concilier tout cela ?

Je me mis en campagne et, très rapidement, grâce à l'aide des spécialistes géologues de la Direction de l'Équipement d'E.D.F., je pus me faire une idée des techniques envisageables pour traiter le problème posé.

Ce problème, quel était-il ? Il s'agissait d'apporter un support expérimental aux analyses d'ordre architectural que J. P. Goidin et G. Dormion menaient depuis plusieurs mois.

Il ne m'appartient pas de rapporter ici, en détail, leurs analyses ; la presse s'en est fait largement l'écho et ils les ont détaillées dans un ouvrage récemment publié.

Disons simplement qu'ils avaient observé à l'intérieur de la Pyramide de Khéops un certain nombre d'anomalies architecturales, certaines déjà connues, d'autres non ; ils les avaient recensées, rapprochées et avaient proposé une explication globale et cohérente. Cette explication impliquait l'existence de cavités inconnues au voisinage des circulations internes à la Grande Pyramide.

D'où la question de Denis Louche : ces cavités, à l'existence fortement présumée, comment en avoir une confirmation physique et, pour cela, quel moyen utiliser dans la Pyramide ?

* * *

(1) MM. Goidin et Dormion sont arrivés pour la discussion.

Les pyramides de Guizéh, je les connaissais, tout au moins en tant que simple touriste ; les ayant visitées il y a déjà plusieurs années, je gardais le souvenir d'une montagne de pierre dont les faces ressemblaient à des escaliers de géant (*voir photo de couverture*).

Sur la face nord, comme cela est le cas pour la plupart des pyramides, il y a une entrée. En réalité, il y en a 2, une authentique que l'on voit ici surmontée de chevrons, l'autre irrégulière aménagée par des pillards à la solde du calife El Mamoun vers l'an 1000.

On pénètre aujourd'hui dans la pyramide par l'entrée des voleurs et, après quelques dizaines de mètres dans une galerie irrégulière, on aborde le couloir ascendant. Ce couloir long d'environ 35 m, incliné de 26 %, est fort étroit (1,05 x 1,10). C'est là le véritable goulot d'étranglement de la pyramide et pour être, utilisable, tout appareil doit pouvoir s'y glisser. Ce couloir ascendant mène à une grande galerie de près de 50 m de long, 2,20 m de large à la base, avec une voûte à encorbellement qui constitue une des splendeurs de la pyramide.

A sa base, un couloir horizontal aussi étroit que le couloir ascendant conduit à la chambre de la Reine.

La grande galerie conduit à la chambre de Khéops ; entièrement construite en granite, c'est la plus grande chambre connue de toutes les pyramides.

Au-dessus de la chambre de Khéops, une structure complexe : les 5 chambres de décharge, découvertes pour la plupart en 1837. Construites en granite ou en calcaire, elles comportent les seules inscriptions connues de la pyramide, mais il est difficile d'y séjourner, encore plus d'y travailler en raison de leur exigüité (1,30 m sous plafond).

Tel est le terrain dans lequel nous devions engager des mesures.

En mai, nous sommes donc arrivés incognito, seul le Dr Ahmed KADRY était au courant et nous avons fait de la microgravimétrie dans les endroits accessibles :

- dans la chambre de Khéops, après les heures de visites,
- dans les chambres de décharge ; le microgravimètre montait l'échelle, au milieu des touristes, et nous découvrons les beautés de la microgravimétrie à la chandelle.

Finalement c'est dans le couloir de la chambre de la Reine que nous avons recueilli les résultats les plus significatifs, et surtout dans une zone qui correspondait aux observations des architectes. Cette convergence entre des méthodes indépendantes a emporté l'adhésion du Dr Kadry qui a alors exprimé le souhait de voir l'opération se poursuivre.

En août 86, après avoir reçu l'accord du Comité des Antiquités, les opérations devaient reprendre. Mais sur un tout autre mode. Nous n'étions plus incognito, tant s'en faut ; grâce au soutien technique de la Société Générale d'Entreprise qui construit le métro du Caire, des matériels inhabituels, des bruits d'échafaudage, investissaient la pyramide.

Cette logistique inappréciable devait nous permettre de réaliser le programme suivant :

- des mesures microgravimétriques complémentaires à des niveaux intermédiaires,
- un examen approfondi des chambres de décharge,
- des microforages dans le couloir de la Reine.

Tout ceci devait se dérouler sous le regard attentif de média plein de sollicitude et ce vaste programme, effectué en 10 jours, a permis une moisson de résultats intéressants. Je vous en laisse juge...

M. le PRÉSIDENT

Je passe la parole à M. LAKSHMANAN. Né en Inde, ingénieur géologue, depuis 28 ans, il anime et dirige la C.P.G.F. (Compagnie de Prospection Géophysique Française). Il fait autorité dans les milieux scientifiques. Qu'il me suffise de vous dire en particulier que c'est le prince de la microgravimétrie dont il va entreprendre de vous dévoiler les mystères. Il parlera au nom de la C.P.G.F. et de son collaborateur, M. ERLING, qui a effectué avec une longue patience et dans des conditions particulièrement inconfortables, sous 1 m de plafond, toutes les mesures dans le couloir de la chambre de la Reine.

La PROSPECTION MICROGRAVIMÉTRIQUE dans la PYRAMIDE de KHÉOPS

par Jacques LAKSHMANAN et J.-C. ERLING

1. RAPPELS SUR LA MICROGRAVIMÉTRIE

Avant d'aborder la mission de microgravimétrie réalisée pour l'opération Khéops, il convient d'effectuer quelques rappels sur la méthode utilisée.

Toute la gravimétrie tient en une ligne, la loi de Newton

$$F = \frac{G m m'}{d^2}$$

G = constante de gravitation universelle.

Ce qui sépare la microgravimétrie de la physique du globe, ce n'est qu'une question d'échelle.

En physique du globe l'unité de mesure est le gal (unité d'accélération de 1 cm/s/s), en prospection pétrolière le milligal, alors qu'en **microgravimétrie** l'unité utilisée est le **microgal**, qui est proche du milliardième de l'attraction de la pesanteur g . En prospection, on effectue des mesures relatives de g , en comparant une station mobile à une base fixe.

L'appareil utilisé, qui est le gravimètre Lacoste et Romberg modèle D, est en réalité un peson très perfectionné (schéma de principe fig. 5). Il comprend une masse m , un levier articulé, un ressort de rappel et une vis micrométrique. La mesure s'effectue en ramenant à chaque fois le fléau dans la position horizontale. L'appareil est thermostatisé et sous vide. Une amplification électronique permet de faire la lecture au microgal près.

Après diverses corrections on arrive à une reprise de mesures généralement meilleure que 5 microgals.

On procède ensuite à diverses corrections géographiques, essentiellement altimétriques, avant d'interpréter les mesures. Une élévation de 1 mètre équivaut à une diminution de g de 300 microgals environ.

En partant des lectures corrigées on commence par faire cette **correction à l'air libre** qui est 308.6 multiplié par la différence d'altitude en mètres (fig. 6).

En opérant sur un sol présentant des dénivelées, il faut faire ensuite la **correction de Bouguer**, qui tient compte de l'attraction vers le bas de la plaque de densité σ et de l'épaisseur Z située entre les niveaux Z_1 (point de mesure) et Z_0 (point de base).

Il faut faire également la **correction de latitude**, qui tient compte d'une augmentation graduelle de g en allant vers le pôle, et dans certains cas des **corrections spéciales de terrain**, lorsque le sol est irrégulier autour du point de mesure.

On aboutit ainsi à une valeur d'**anomalie de Bouguer** B , qui serait nulle dans le cas d'un sous-sol parfaitement homogène.

Lorsqu'on effectue des **mesures en forage**, la formule calculant l'anomalie de Bouguer B est peu différente (fig. 7). La plaque de densité σ située entre 2 points intervient 2 fois dans le calcul par différence. En 1 elle attire le

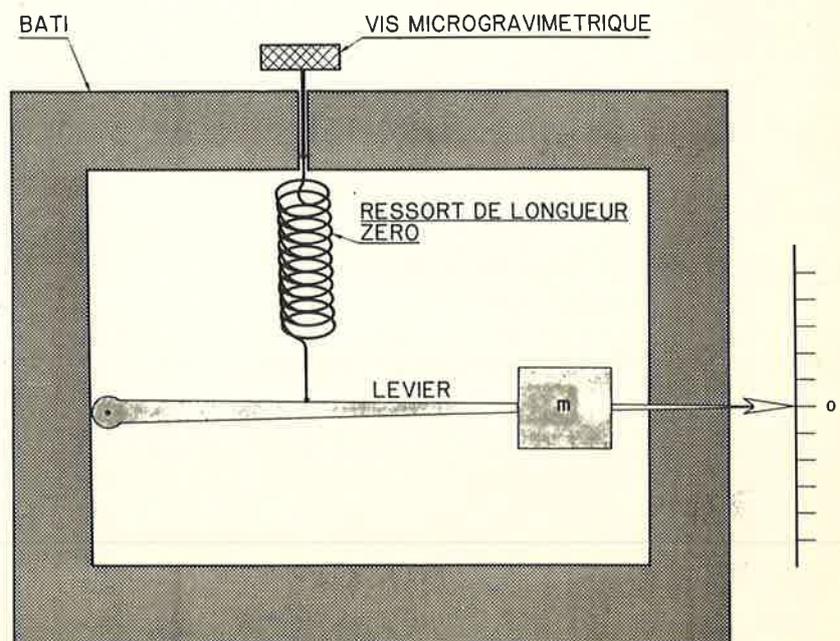
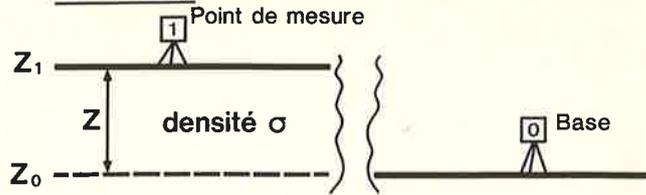


Fig. 5. — Schéma de principe d'un gravimètre.

(a) Mesures à la surface du sol

* SOL PLAN



LECTURES CORRIGÉES

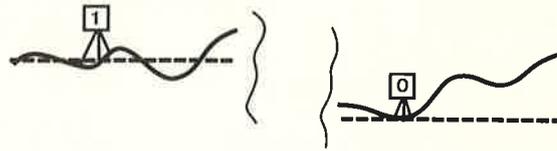
CORRECTION DE BOUGUER

$$B(1)-B(0)=L(1)-L(0)+308,6(Z_1-Z_0)-41,9\sigma(Z_1-Z_0)$$

ANOMALIE DE BOUGUER

CORRECTION A L'AIR LIBRE

* SOL IRREGULIER

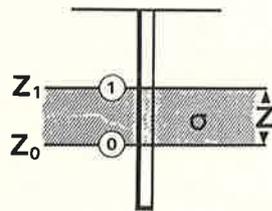


* AUX CORRECTIONS PRECEDENTES S'AJOUTE LA CORRECTION DE "TERRAIN": $+C(1)-C(0)$

* LORSQUE LES TERRAINS DE SURFACE SONT HETEROGENES

- CORRECTIONS DE BOUGUER A σ VARIABLE
- CORRECTIONS DE TERRAIN A σ VARIABLE

Fig. 6. — Corrections en microgravimétrie.



$$L(1)-L(0)=B(1)-B(0)-308,6(Z_1-Z_0)+2 \times 41,9 \sigma (Z_1-Z_0)+C(1)-C(0)$$

CORRECTIONS DE TERRAIN

LA PLAQUE σ , Z_1, Z_0 INFLUE 2 FOIS:

- ELLE AUGMENTE g EN ①
- ELLE REDUIT g EN ②

ON PEUT EN DEDUIRE LA DENSITE

$$\sigma = \frac{308,6}{83,8} + \frac{1}{83,8} \frac{L(1)-L(0)}{Z_1-Z_0} - \frac{1}{83,8} \frac{B(1)-B(0)}{Z_1-Z_0} - \frac{1}{83,8} \frac{C(1)-C(0)}{Z_1-Z_0}$$

LECTURES

$$\sigma \text{ APPARENTE} = 3,683 + \frac{1}{83,8} \frac{L(1)-L(0)}{Z_1-Z_0}$$

σ : DENSITE "APPARENTE" DE LA PLAQUE Z_1, Z_0

σ APPARENTE = σ VRAI EN COUCHES HORIZONTALES.

Fig. 7. — Gravimétrie en forage.

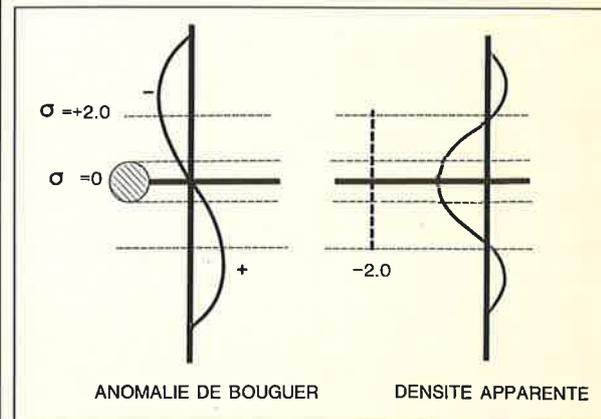
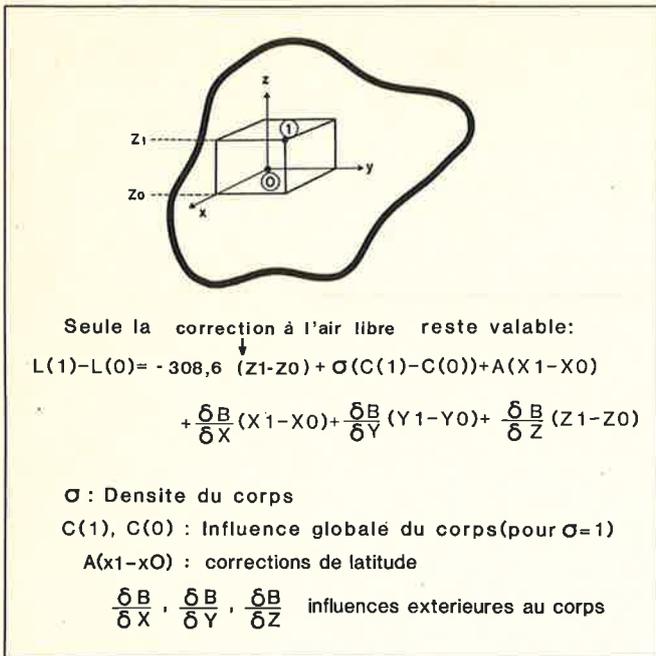


Fig. 8. — Gravimétrie en forage, influence d'une cavité latérale.



gravimètre vers le bas et en 2 vers le haut. A partir de la formule indiquée, et en négligeant les variations verticales du Bouguer B et de la correction de terrain C, on peut calculer une densité apparente σ .

En couches horizontales cette densité apparente sera égale à la densité réelle de la plaque Z_1, Z_0 .

Avec des mesures verticales de ce type, si on passe à côté d'une cavité située dans un milieu de densité $\sigma = 2$, on aura une anomalie négative au-dessus de la cavité et une anomalie positive en dessous (fig. 8).

En raisonnant en densité apparente, on aura une courbe plus facile à interpréter. On n'atteindra pas la valeur -2 , correspondant à la cavité, mais le minimum sera bien situé en face de cette cavité.

Si on dispose de lectures L sur ou à l'intérieur d'un corps fini homogène (fig. 9), la formule se complique davantage. La correction à l'air libre est inchangée, mais les corrections de Bouguer et de terrain se combinent en une correction unique C liée à la forme du corps.

Fig. 9. — Gravimétrie à l'intérieur d'un corps fini homogène.

2. APPLICATION A LA PYRAMIDE DE KHÉOPS

2.1. Préambule

La pyramide peut être considérée comme un cas particulier d'un corps fini homogène (fig. 10).

Le champ gravifique mesuré regroupe en réalité deux types d'influences :

- l'influence d'une pyramide théorique C (y compris les vides connus) qu'on peut appeler « pyramidoloïde » par analogie avec le géoïde terrestre,
- l'influence des anomalies inconnues A, situées au voisinage des divers points.

A partir des lectures L et des coefficients d'influence théorique C, un processus de calcul mathématique permet de déterminer :

- la densité moyenne σ du modèle,
- les variations régionales de g dues à des causes extérieures,
- les anomalies résiduelles en chaque point, obtenues par différence entre les lectures et l'anomalie théorique.

A partir de ces anomalies résiduelles on peut également calculer des déviateurs locaux de la densité, puis établir une carte des densités apparentes à chaque niveau de mesures.

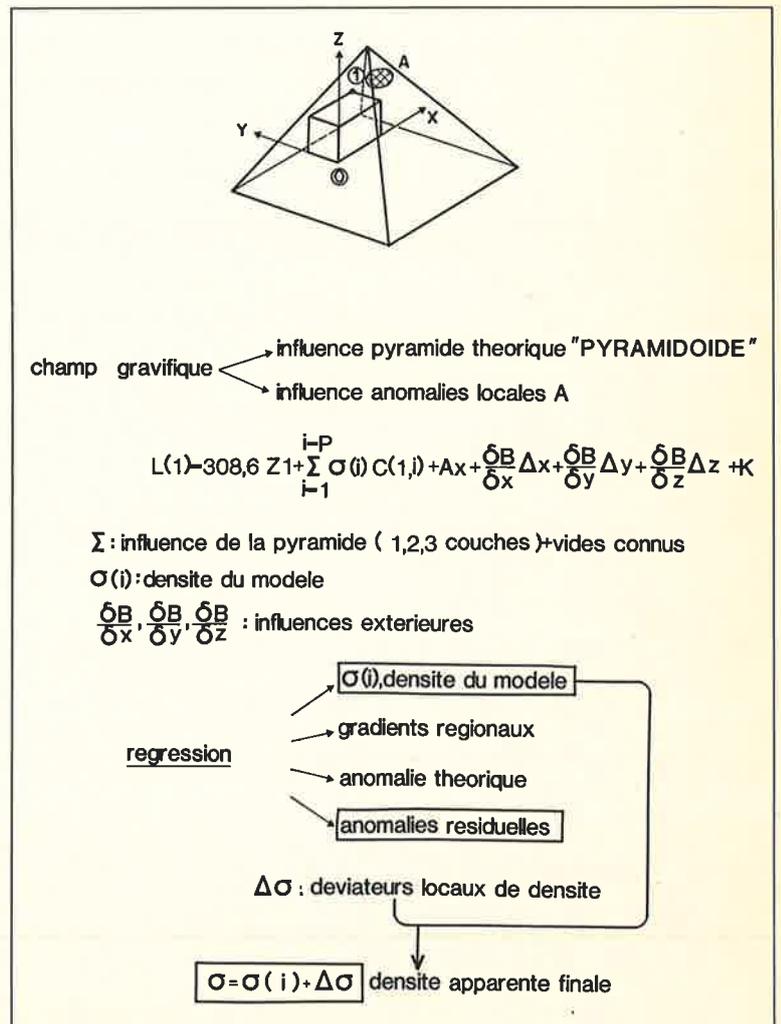


Fig. 10. — Gravimétrie théorique à l'intérieur de la pyramide.

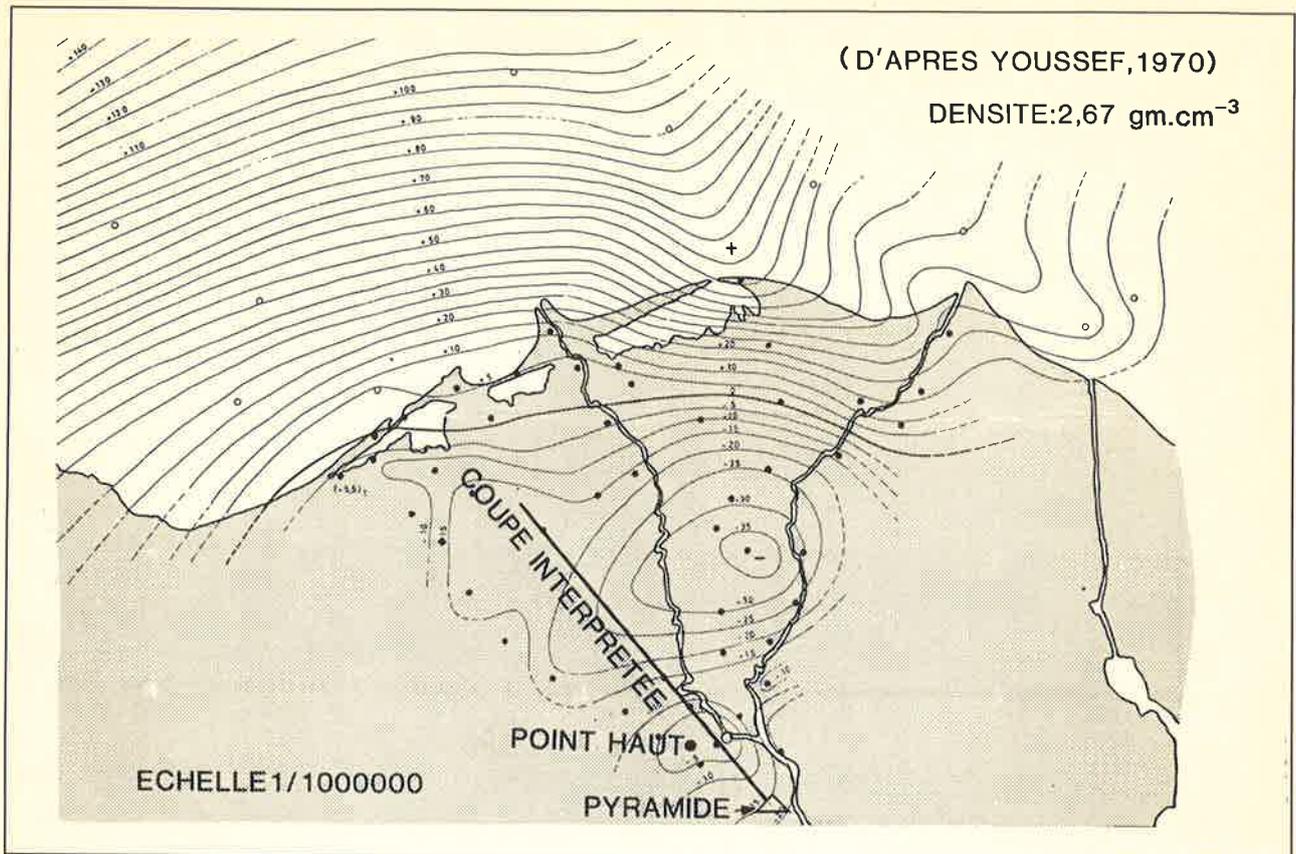


Fig. 11. — Carte de l'anomalie de Bouguer dans le delta du Nil.

2.2. Traitement préliminaire

Nous avons examiné d'abord les variations régionales de g , dues aux causes extérieures et les corrections éventuelles à apporter.

La figure 11 montre un extrait de la carte gravimétrique au niveau du delta du Nil.

Une représentation en coupe de la variation gravimétrique régionale, passant par l'aplomb de la pyramide de Khéops est indiquée sur la figure 12. L'interprétation du champ gravimétrique à cet endroit, qui marque un dôme avec un maximum au Nord-Ouest de la pyramide, nous conduit à admettre l'hypothèse d'une plaque lourde de 3 km d'épaisseur environ, située vers 17 km de profondeur. L'effet de cette plaque sur le calcul de la densité de la pyramide est extrêmement faible. Négliger son effet conduirait à une erreur sur la densité de 0,003 t/m³.

Un autre correctif à apporter éventuellement est celui dû à l'influence de la vallée du Nil. A 250 m au Nord-Est de la pyramide, se situe un abrupt de 40 m environ, où le plateau de Gizeh domine la plaine du Nil. Les calculs montrent que pour corriger l'influence de cette dépression il faut majorer les densités apparentes de la pyramide de 5 à 7 %.

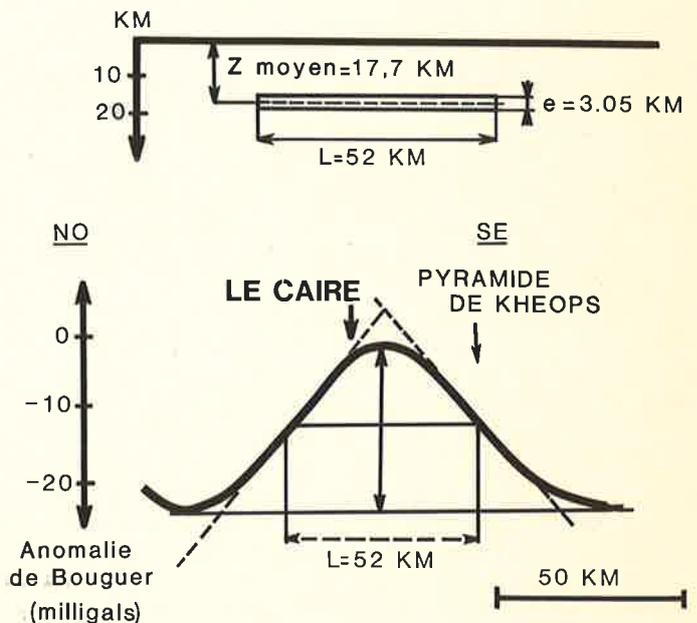


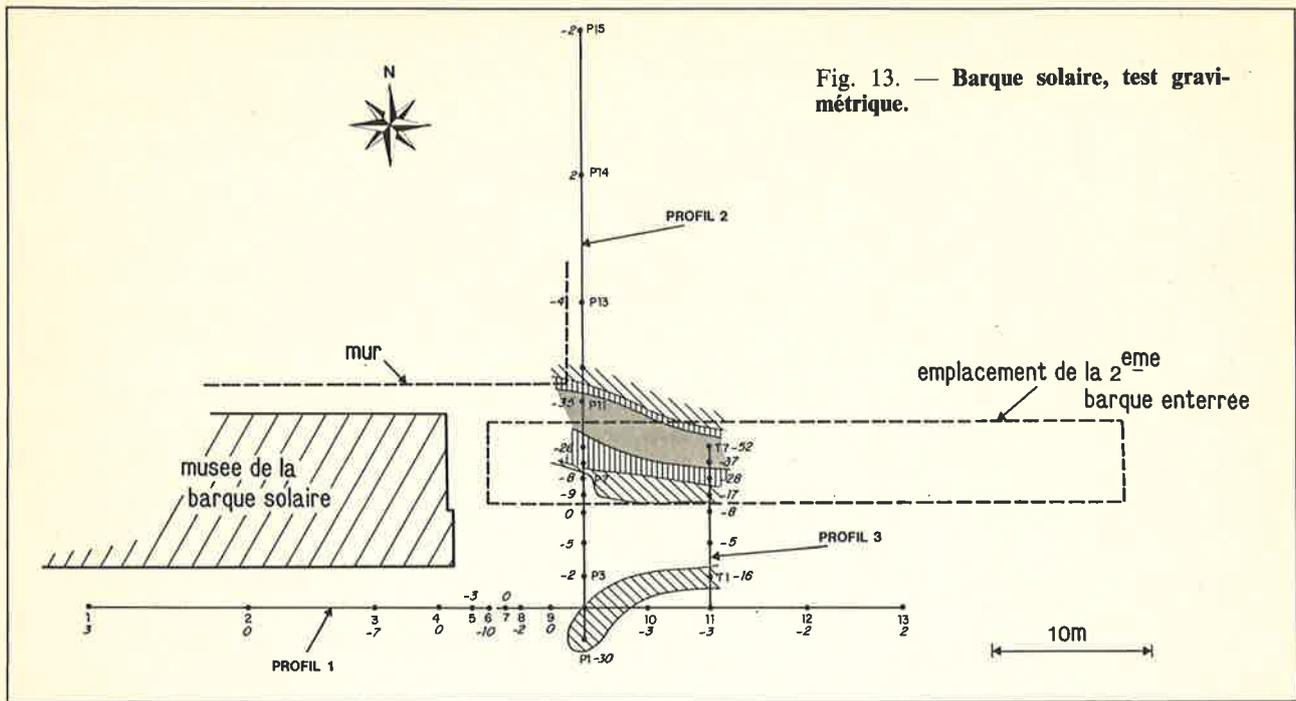
Fig. 12. — Coupe gravimétrique régionale.

été effectuée sur le site d'une cavité connue (musée de la barque solaire), en bordure Sud de la pyramide, dans le but de justifier l'efficacité de cette méthode. Ce site révèle la présence d'une deuxième barque solaire enterrée dans une fosse de 40 m de longueur environ.

2.3. Exécution des mesures

2.3.1. Test sur la barque solaire (fig. 13)

En dehors de la prospection dans la pyramide elle-même, une intervention en microgravimétrie a également

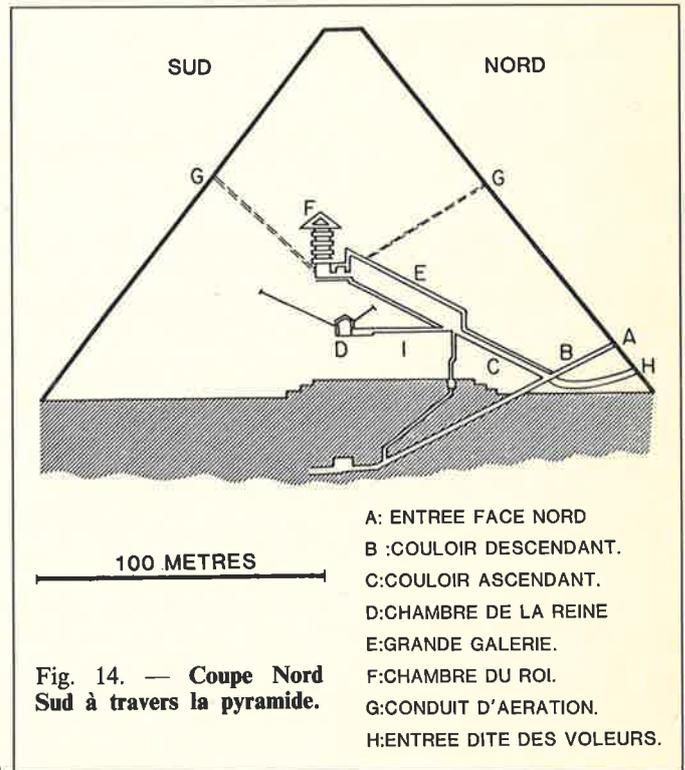
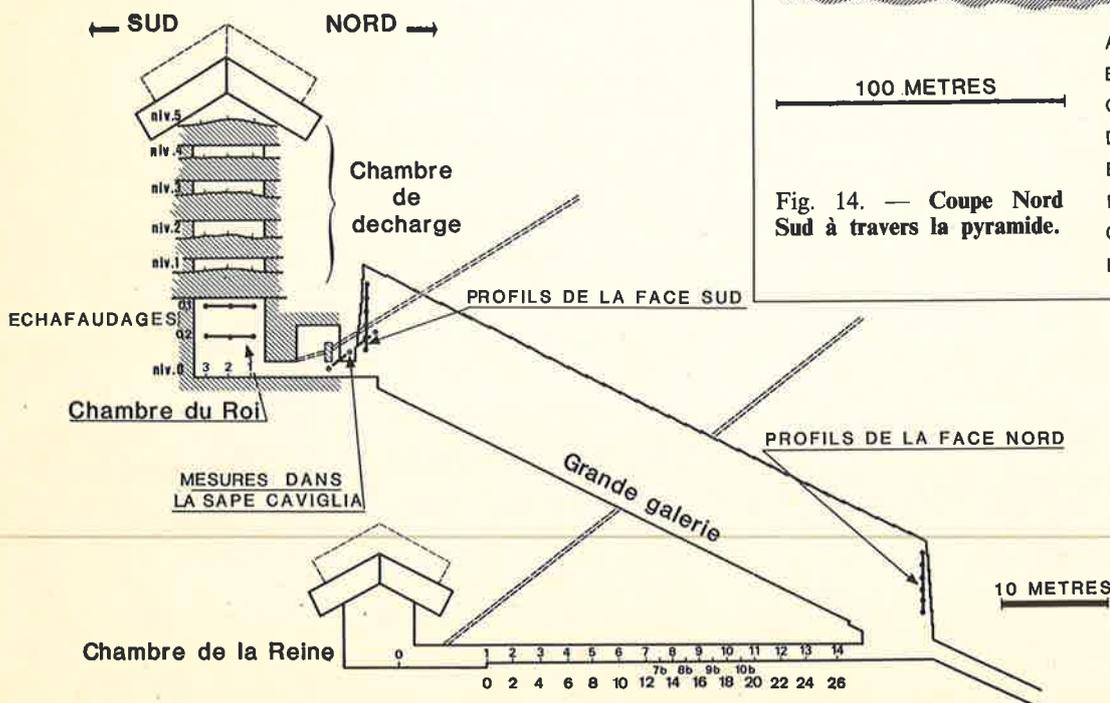


Trois profils gravimétriques réalisés sur une topographie plane ont montré nettement au droit de la barque présumée des anomalies de -30 à -50 microgals.

2.3.2. Mesures à l'intérieur de la pyramide (fig. 14 et 15)

Il a été réalisé ensuite un programme de mesures gravimétriques dans toutes les salles et galeries accessibles à l'intérieur de la pyramide.

Fig. 15. — Coupe d'implantation des mesures gravimétriques.



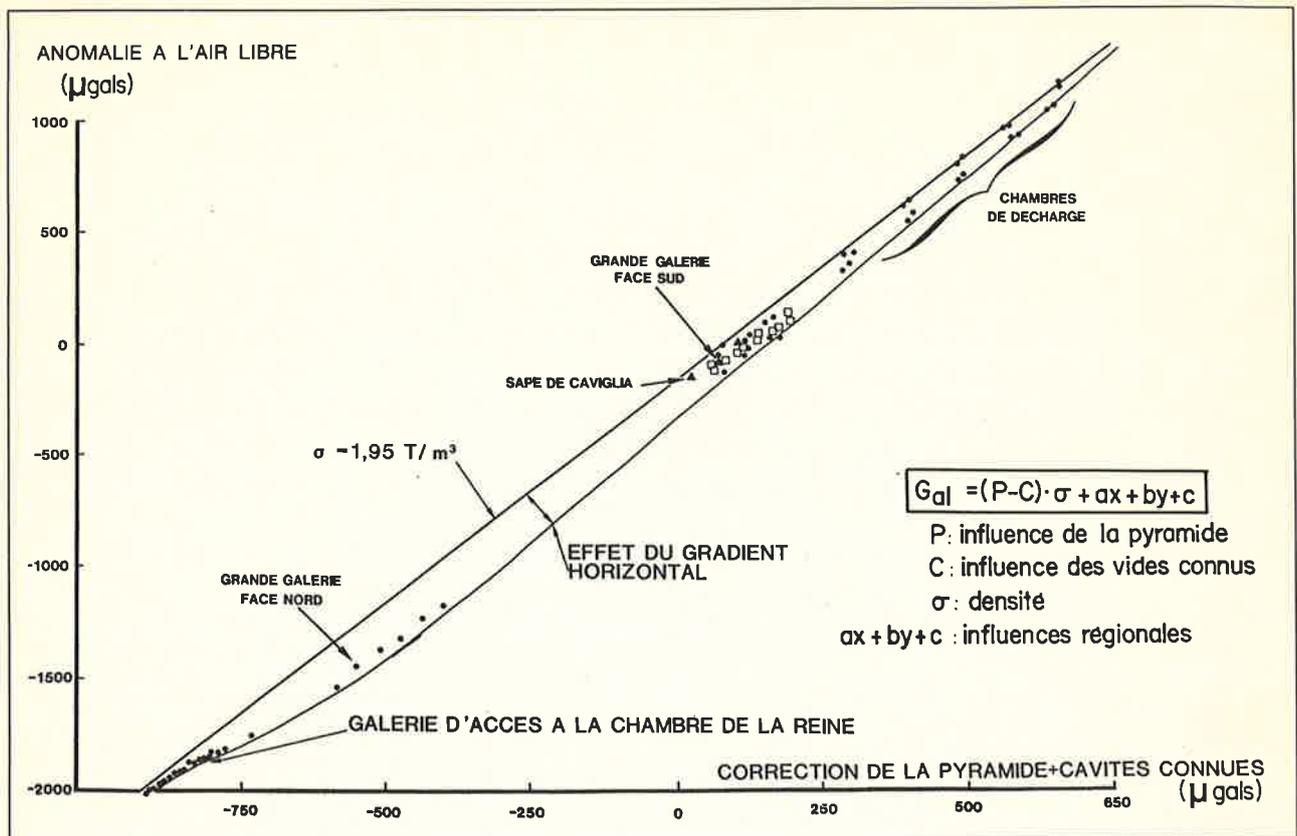


Fig. 16. — Évaluation globale de la densité de la pyramide.

Les mesures ont concerné :

- la chambre du Roi et les chambres de décharge,
- la galerie d'accès à la chambre de la Reine,
- les 2 extrémités de la grande galerie.

Au total 218 stations ont été effectuées.

Notons que les relevés topographiques et gravimétriques ont été réalisés dans des conditions particulièrement difficiles :

- dans la chambre du Roi et aux 2 extrémités de la grande galerie (mesures sur des échafaudages),
- dans les chambres de décharge (hauteur ne dépassant pas, par endroit, 50 à 60 cm).

2.4. Détermination d'une densité moyenne de la pyramide (fig. 16)

A partir de l'ensemble de ces mesures on a pu évaluer une densité moyenne de la pyramide.

Sur la figure 16 nous avons représenté :

- en ordonnée la valeur mesurée de la gravité, corrigée de l'air libre, et variant dans une plage entre + 1 000 et - 2 000 microgals,
- en abscisse l'influence théorique de la pyramide P, compte tenu des vides connus à l'intérieur de la pyramide, c'est-à-dire du paramètre C ; P et C sont calculés pour densité de 1 t/m³.

Le paramètre P varie de - 750 à + 750 microgals et le paramètre C peut atteindre des valeurs de 250 microgals. Le calcul de l'influence des vides C a nécessité un travail

important de digitalisation. Enfin une dernière influence a été calculée, qui est la surdensité du granite entourant la chambre du Roi et les chambres de décharge.

La formule indiquée sur la figure 16 montre la relation existant entre :

- la gravité à l'air libre Gal,
- l'influence de la pyramide P, corrigée de C, influence des vides connus, et multipliée par σ, qui est la densité moyenne à déterminer,

$$Gal = (P - C) \sigma + ax + by + c$$

Il faut tenir compte également du terme ax + by + c, représentant l'influence des causes situées à l'extérieur de la pyramide.

La droite moyenne nous donne une densité de l'ordre de 1,95 t/m³. Si on majore cette valeur de 5 % pour tenir compte de l'effet de la vallée du Nil on arrive à une densité moyenne (granite compris) de l'ordre de 2 t/m³.

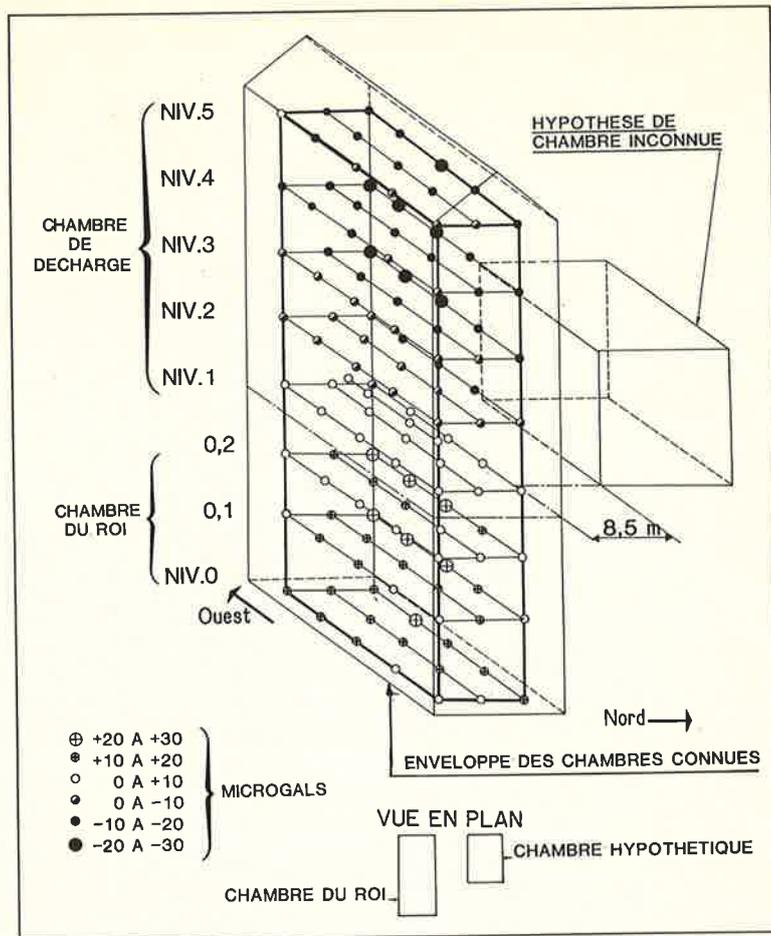
On peut signaler, par ailleurs, que les mesures suggèrent également une répartition zonale des densités à l'intérieur de la pyramide ; la partie inférieure Sud-Ouest pouvant être plus lourde que la moyenne calculée.

2.5. Repérage d'anomalies locales au sein de la pyramide

Le modèle mathématique adopté a permis de calculer l'anomalie théorique de la « pyramidoïde » et, par différence avec le modèle expérimental, l'anomalie gravimétrique résiduelle en chaque point.

Cet aspect de l'interprétation répond directement aux objectifs initiaux de la mission.

Fig. 17. — Anomalie due à une chambre hypothétique.



Rappelons que la gravimétrie permet de localiser des anomalies de masse et non directement des cavités. Les cavités éventuelles sont indiquées par une interprétation des mesures, contrôlée ensuite par forages.

2.5.1. Chambre du Roi et chambres de décharge

Dans la chambre du Roi et les chambres de décharge ont été réalisés 8 niveaux de 15 mesures qu'on peut regrouper sous forme d'un bloc gravimétrique.

La figure 17 montre les résultats d'une simulation théorique, correspondant à l'influence d'une chambre telle qu'elle avait été esquissée au démarrage de la prospection. Dans la partie haute du modèle nous avons des valeurs négatives de -30 microgals, signifiant qu'on est au-dessus d'un vide hypothétique. Dans la partie basse nous avons à l'inverse, des valeurs de +30 microgals.

Si l'on se reporte aux résultats obtenus à partir des mesures (fig. 18), on observe par contre un certain nombre d'anomalies beaucoup plus dispersées. Leurs causes ne peuvent être que beaucoup plus petites que la chambre simulée et située à très faible distance. On peut pencher pour l'hypothèse de zones moins compactes ou de remplissage derrière les dalles de granite.

A partir de ces anomalies résiduelles on a calculé également des cartes de densité apparente. La figure 19 montre une coupe verticale passant par la chambre du Roi et les chambres de décharge. Les densités apparentes calculées varient entre 1,85 et 2,05 t/m³.

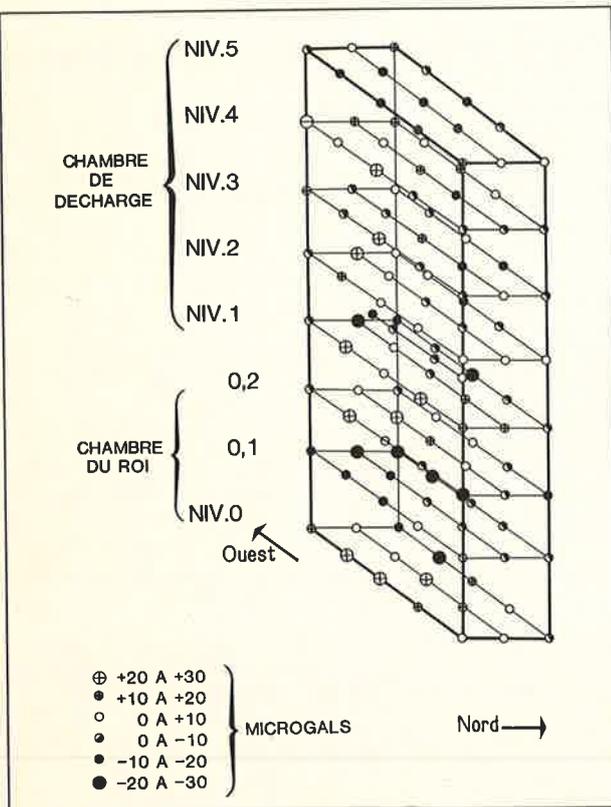
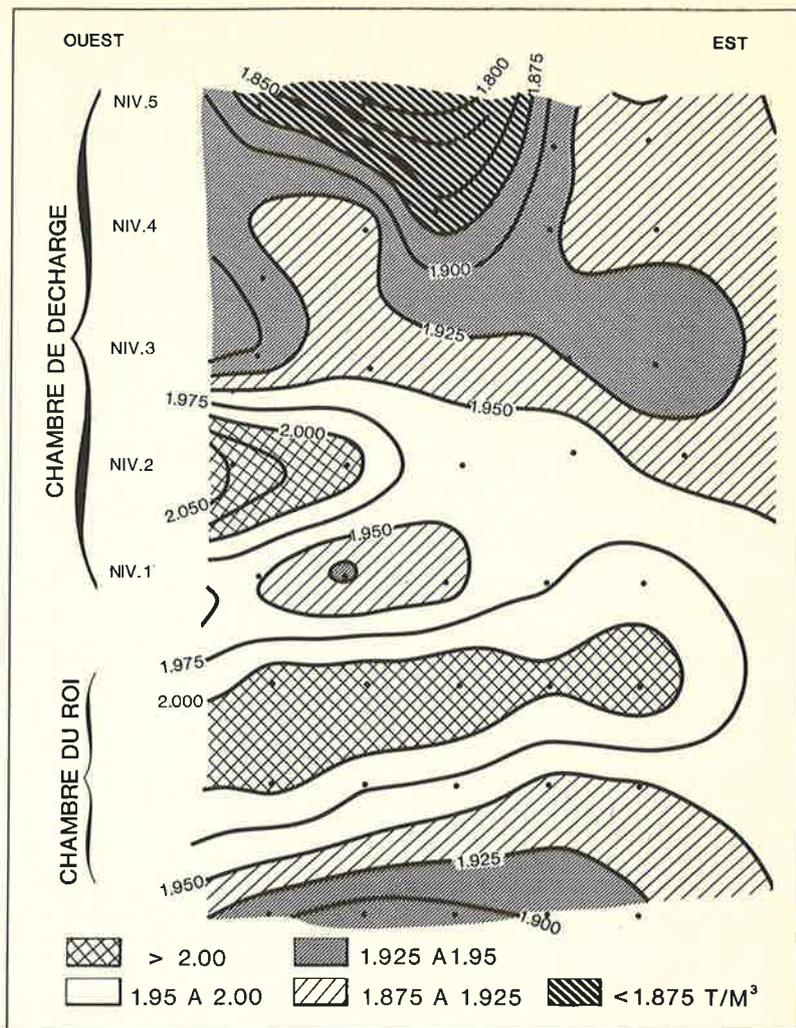


Fig. 18. — Anomalie résiduelle dans la chambre du Roi et dans les chambres de décharge.

Fig. 19. — Cham-
bre du Roi : densités
apparentes.



← Vers la chambre de la Reine

Vers l'entrée →

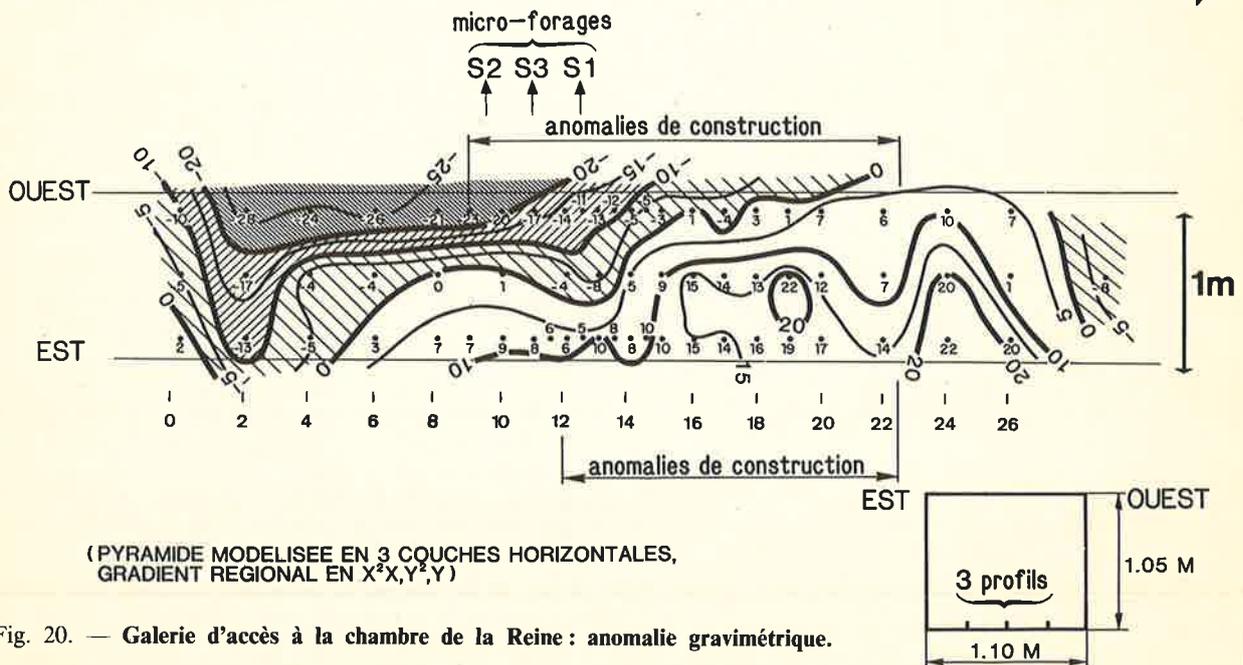


Fig. 20. — Galerie d'accès à la chambre de la Reine : anomalie gravimétrique.

2.5.2. Galerie de la Reine

Dans cette galerie horizontale conduisant à la chambre de la Reine ont été réalisés 3 profils distants de 40 cm, comprenant chacun une vingtaine de mesures espacées de 50 cm à 2 m. Il s'agit probablement de l'étude la plus fine de microgravimétrie qui ait jamais été réalisée.

Sur cette carte (fig. 20) vue d'en haut, on voit clairement deux zones :

- vers l'entrée à droite une zone lourde de + 15 à + 20 microgals,
- à gauche, vers la chambre de la Reine et sur le côté Ouest une zone négative de - 20 à - 25 microgals, c'est-à-dire présentant avec la zone précédente une différence de - 45 microgals.

La zone négative peut être considérée comme une anomalie parfaitement significative.

Une représentation en coupe (fig. 21) montre nettement une diminution de cette anomalie vers l'Ouest. Malheureusement, on ne connaît pas le niveau bas de la courbe (valeur minimale de l'anomalie), les mesures étant limitées à l'emprise de la galerie. Nous avons donc fait différentes interprétations, suivant la position du minimum. Ces interprétations conduisent toutes à supposer l'existence d'anomalies de masse situées vers l'Ouest de la galerie et plutôt en dessous. Il convient par ailleurs d'observer la coïncidence de la partie droite de cette anomalie avec des anomalies de structures observées par les architectes. C'est à cet endroit qu'on été implantés trois forages de contrôle, qui ont rencontré une poche de sable à deux mètres derrière la paroi.

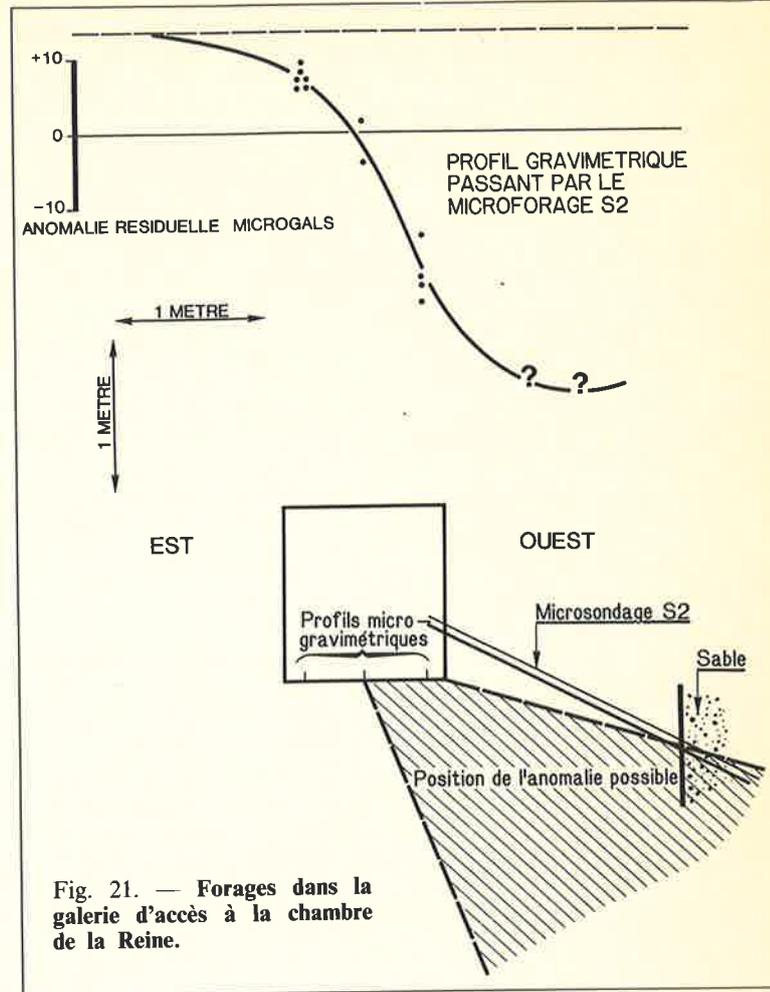


Fig. 21. — Forages dans la galerie d'accès à la chambre de la Reine.

3. CONCLUSION

L'adaptation de la microgravimétrie aux problèmes posés par la pyramide de Khéops nous conduit aux remarques suivantes.

Tout d'abord nous avons montré que cet outil, classique pour la recherche de vides, pouvait être parfaitement utilisé dans un contexte complexe, et que les nombreuses corrections n'étaient pas un obstacle à l'interprétation des mesures.

Ensuite, et c'est peut-être la nouveauté de cette campagne, on voit apparaître une méthode d'auscultation des ouvrages en souterrain avec la mesure de la densité *in situ*.

D'autre part, nous avons apporté des éléments de connaissance structurale en pesant en quelque sorte la pyramide. L'interprétation de la densité moyenne calculée, de l'ordre de 2 t/m^3 , est à débattre à la lumière des densités connues : 2,06 pour le calcaire local, 2,6 pour le calcaire de Tura et peut-être 1,8 pour des remblais. On

pourrait admettre l'hypothèse d'une pyramide homogène constituée essentiellement de calcaire local.

Avec d'autres mesures sur et dans la pyramide, on pourrait obtenir une meilleure modélisation, ce qui a un triple intérêt :

- un intérêt historique, pour mieux connaître le processus constructif,
- un intérêt géomécanique, pour éclairer l'étude de stabilité entreprise par E.D.F. au cœur de l'édifice (chambre du Roi et chambres de décharge),
- un intérêt, pour orienter la recherche de cavités éventuelles.

Pour la détection de cavités dans la pyramide de Khéops il reste encore des points à ausculter : la chambre de la Reine, la grande galerie...

M. le PRÉSIDENT

Merci bien vivement M. Lakshmanan. Nous notons qu'en raison d'un volume de la pyramide de $2\ 600\ 000\ \text{m}^3$, une diminution de densité de 0,4 correspond à un amaigrissement de 1 000 000 de tonnes.

Je passe la parole à M. LEMOINE, ingénieur géologue, Directeur Adjoint de la C.P.G.F., qui va vous entretenir des trois sondages exécutés dans le couloir de la chambre de la Reine.

MICROFORAGES dans la PYRAMIDE de KHEOPS

par Yves LEMOINE

Les anomalies d'architecture coïncidant sur une certaine distance avec les anomalies gravimétriques observées dans la galerie d'accès à la chambre de la Reine, il était logique

de passer à l'étape ultérieure : visualiser les magasins présumés.

I. MOYENS MIS EN ŒUVRE

Deux solutions avaient été envisagées à l'origine :

- la première consistait à démonter le plancher, à trouver la porte, et à pénétrer à l'intérieur,
- la deuxième, moins lourde, consistait à faire des sondages et ensuite à regarder l'intérieur des salles à l'aide d'un endoscope.

La deuxième solution a été adoptée. Cependant, la réalisation de microsondages devait se plier à un certain nombre d'impératifs liés aux contraintes du site, c'est-à-dire l'accessibilité et la protection du site :

- exigüité du couloir (1,05 m × 1,05 m),
- manque d'aération,
- diamètre nominal le plus petit possible pour être le moins traumatisant possible,
- possibilité de réaliser des sondages inclinés,
- pas de percussion ni de sondages destructifs.

On a choisi, en le modifiant légèrement, un matériel destiné à prélever des carottes de béton dans les parois en béton armé, notamment dans les centrales nucléaires. Il s'agit d'une carotteuse présentant les caractéristiques suivantes :

- moteur électrique : 2,3 kVA,

- glissière-crémaillère de 1 m de long,
- genouillère permettant le choix de l'angle d'attaque désiré,
- tiges allonges et carottiers simples diamantés de 30 cm de long,
- diamètre de forage $\left\{ \begin{array}{l} 50 \text{ mm pour l'avant-trou,} \\ 35 \text{ mm} \end{array} \right.$

L'endoscope a été choisi en fonction de sa qualité optique :

- marque : BODSON,
- type : rigide à miroirs,
- longueur unitaire des tiges de 80 cm,
- vision oculaire avec possibilité d'adapter soit un appareil photo, soit une caméra.

De surcroît, plusieurs dispositions avaient été prévues pour la sécurité :

- avant-trou \varnothing 50 mm sur 10 cm de long pour pose et scellement d'un tube métallique fileté, le filetage permettant soit l'obturation du trou, soit la pose d'une vanne,
- matériel pour prélèvements d'air (pompe à vide, ampoules de prélèvement).

2. RÉSULTATS

Le Service des Antiquités Égyptiennes a demandé un test avant d'agréer le processus de foration. Celui-ci a été réalisé à l'extérieur, sur un bloc de calcaire destiné à la rénovation du Sphinx, et dont la dureté devait être comparable à celle des pierres constituant les parois du couloir.

Dans le couloir de la Reine, et sur les indications des architectes, trois microsondages ont été réalisés avec les caractéristiques suivantes :

- hauteur d'attaque à 30 cm environ au-dessus du plancher,
- inclinaison vers le bas entre 30 et 40° sur l'horizontale,
- longueur de foration entre 2,35 m et 2,65 m,
- écartement des forages : 1,30 m.

Les principaux résultats peuvent se résumer comme suit :

- mise en évidence d'un premier bloc de calcaire très dur d'environ 2 coudées (2 × 53 cm) de large,
- au-delà, présence de 1 ou 2 blocs d'une coude de large en calcaire plus tendre. Les joints sont en général très serrés,

- sur ces blocs, et avant de déboucher dans le sable, les microsondages 1 et 3 ont mis en évidence du mortier,

- mise en évidence d'une importante couche de sable ; aux 3 sondages, le sable a été rencontré sur des épaisseurs variables :

10 cm au S2
20 cm au S1
40 cm au S3,

- au-delà du sable, la maçonnerie calcaire a été retrouvée sur les S1 et S2. Pour le S3 la longueur unitaire des tiges de 30 cm n'a pas permis d'aller au-delà d'une longueur totale de 2,55 m. La tentative faite a failli se terminer par un coincement généralisé du train de tiges.

La figure 21 montre une section schématique passant par le sondage S2, avec la confrontation entre sa coupe et les mesures microgravimétriques.

En conclusion, les microforages réalisés dans des conditions d'environnement très difficiles, ont confirmé l'existence d'une anomalie de masse appréciable, dans la zone de coïncidence entre les anomalies microgravimétriques et les anomalies de construction signalées par les architectes.

M. Le PRÉSIDENT

Je passe la parole à M. DELETIE, bien connu dans tous les milieux de géologues, parce qu'il est responsable des expertises les plus délicates à la Direction de l'Équipement d'E.D.F.

OBSERVATIONS GÉOMÉCANIQUES de la PYRAMIDE de KHEOPS

par Pierre DELETIE

M. Lakshmanan et M. Lemoine nous ont présenté les résultats des mesures microgravimétriques et des trois microforages réalisés dans le couloir d'accès à la Chambre de la Reine.

Parallèlement à ces travaux un examen attentif des déformations et des ruptures dans le secteur de la Chambre du Roi (Chambre du Roi s.s. et les cinq chambres de décharge) a été réalisé pour essayer de comprendre le comportement géomécanique de cette structure (fig. 14). Cette étude est actuellement en cours et nous vous donnerons donc ici, uniquement les premiers résultats de nos observations.

L'ensemble constitué par la Chambre du Roi et les chambres de décharge est en effet très particulier :

- la Chambre du Roi est entièrement en granite,
- toutes les poutres des radiers des chambres de décharge sont en granite (leur poids peut dépasser 80 tonnes),
- ces poutres s'appuient sur les parements sud et nord, sur des blocs de granite puis de calcaires (à partir de la chambre n° 3) (fig. 22),
- le toit de la chambre n° 5 est constitué de dalles de calcaire massif formant un chevron.

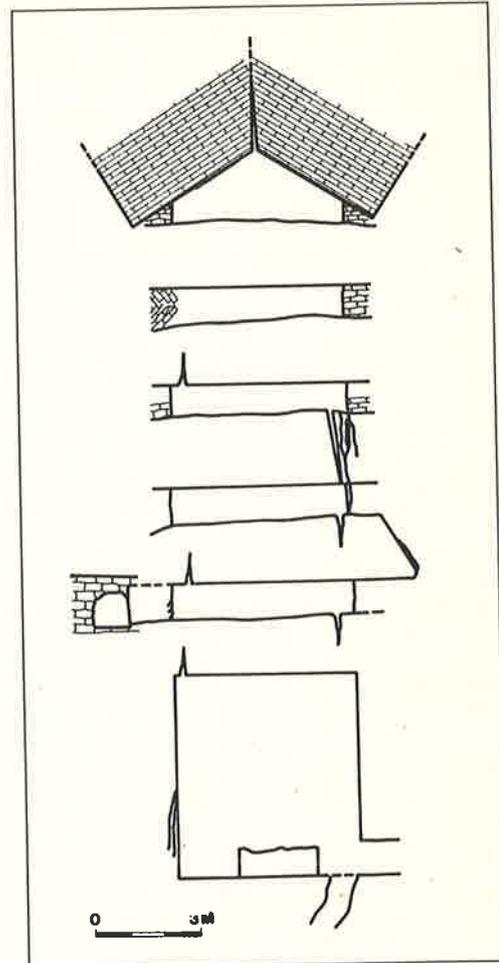


Fig. 22. — Relevé des fissures au-dessus de la chambre du Roi.

1. EXAMEN DE LA FISSURATION

L'examen des différentes galeries et chambres de la grande pyramide montre que les fissures et les déformations ne sont importantes que dans le secteur de la Chambre du Roi. En effet, dans la Grande galerie, le couloir de la Reine, et la partie visible des conduits de ventilation, seules quelques fissures affectent les blocs de l'appareillage.

Quelques-unes des principales fissurations observées dans le secteur de la Chambre du Roi, sont :

- des écailles de granite dans la partie E du longpan Sud de la Chambre du Roi ; ces écailles situées au voisinage du conduit de ventilation présentent l'aspect d'écailles de décompression, elles recoupent plusieurs joints de construction sans aucun décrochement,
- une fissure ouverte dans une poutre, du radier de la chambre n° 2 (face Nord),
- une fissure ouverte dans une poutre du toit de la chambre n° 3 (face Sud).

Ces deux dernières fissures, ont des positions que l'on retrouve d'une façon systématique ; en effet, pour les trois premières chambres, les poutres sont fissurées en partie basse côté Sud et en partie haute côté Nord :

- les blocs calcaires supportant les poutres ou les chevrons sont localement éclatés (chambre n° 4 et chambre n° 5),
- une fissure semble traverser entièrement une poutre entre les chambres 2 et 3,
- les dalles calcaires formant chevron au toit de la chambre n° 5 sont décollées et ouvertes ; elles ont été, à deux reprises au moins, colmatées par du mortier,
- les tympanes Est et Ouest de la chambre de décharge n° 5 ne sont pas appareillés, ils sont constitués par des blocs de « tout venant » de la pyramide et ils ont subi des déplacements plus importants que l'ensemble de l'ouvrage de la Chambre du Roi.

2. NATURE DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX CONSTITUANT L'OUVRAGE

Le granite

C'est un granite porphyroïde classique, il constitue l'appareillage de la Chambre du Roi et les poutres de toutes les chambres de décharge. Sa densité est de $2,65 \text{ t/m}^3$.

Les calcaires

- Le calcaire d'appareillage est un calcaire massif à grain fin sublithographique. Il contient des spicules d'éponges siliceux. Sa densité est de $2,60 \text{ t/m}^3$.
- Le calcaire de remplissage, provenant de carrières locales, est un calcaire à nummulites, relativement poreux, sa densité varie de $2,2$ à $2,4 \text{ t/m}^3$.

Les mortiers (1)

Ces mortiers comblent localement les vides entre les blocs du remplissage (cf. galerie d'accès actuelle) ou certaines fissures :

• *les mortiers grossiers* : Ce sont des mortiers réalisés à partir d'un mélange de grains d'anhydrite *roulés* et bien classés dans un liant de plâtre parfois associé à un matériel argileux pigmenté d'oxydes de fer.

• *les mortiers fins blanchâtres*, colmatant certaines fissures sont constitués de grains d'anhydrite *anguleux assez bien classés* souvent *évolués en gypse*, le liant est représenté par du plâtre. Ces mortiers sont comparables à ceux de Ounas (2350 av. J.-C.) (2).

Le « sable » du couloir de la Reine

Ce sable rencontré en forage est un sable à dominante quartzreuse très bien classé. L'examen microscopique montre qu'il a une origine *éolienne* certaine, toutefois les dépôts et concrétions récentes sur les grains n'ont pas encore permis de déterminer, si ces grains présentaient également une usure fluviale secondaire.

3. ÉTUDE GÉOMÉCANIQUE DE LA CHAMBRE DU ROI

Les éléments constitutifs de la Chambre du Roi, et les chambres de décharge subissent essentiellement leur propre poids et la charge due à la pyramide elle-même.

Le comportement de cette partie de l'ouvrage est comparable à celui d'une excavation souterraine.

Depuis une vingtaine d'années, E.D.F. procède à des études de stabilité de ses cavités souterraines à l'aide de calculs aux éléments finis, et l'une d'entre elles en particulier, l'usine de la Saussaz II présente plusieurs analogies avec les chambres de Khéops (charge, anisotropie des déformations) (fig. 23).

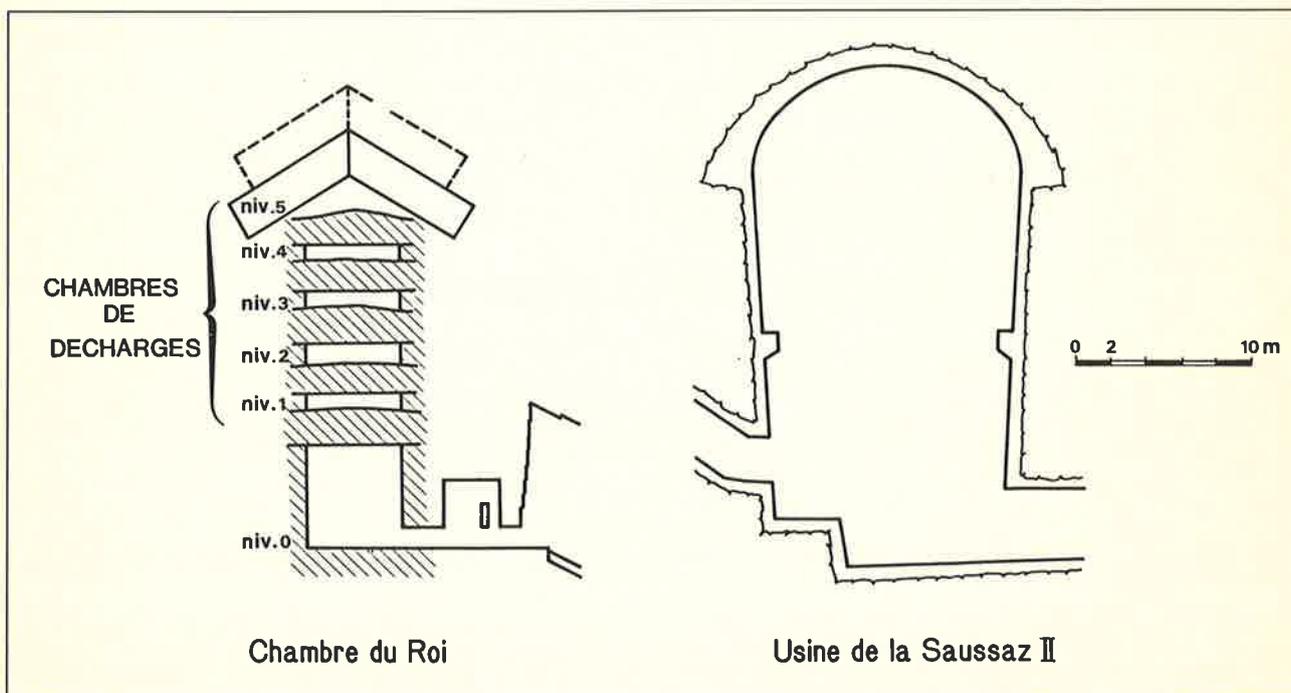


Fig. 23. — Comparaison entre la chambre du Roi et l'usine de la Saussaz II.

(1) Examens réalisés par le laboratoire de Géologie des ensembles sédimentaires de l'Université de Nancy.

(2) Analyse du Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques.

Les données « naturelles » nécessaires à ce type de calculs permettant de connaître les déformations et les contraintes à attendre lors de l'excavation de l'ouvrage sont :

- les caractéristiques physiques de la roche encaissante (modules d'Young, coefficient de Poisson, résistance à la compression, à la traction, etc...),
- les contraintes « *in situ* »,
- la forme de la cavité,
- les anisotropies.

Dans le cas de la Chambre de Khéops, nous connaissons ou pouvons estimer la plupart de ces paramètres ; le but de ce calcul sera donc de déterminer :

- si l'ensemble des déformations observées sont explicables par le calcul (direction, amplitude),
- si l'épaisseur du remplissage est affectée par la présence de la structure de la Chambre du Roi.

Certains paramètres devront être ajustés en tenant compte d'observations particulières ou de résultats d'analyses. En particulier, les premiers résultats d'analyse polliniques⁽¹⁾ dans les mortiers, semblent confirmer que

les déformations au niveau des chevrons se sont produites, lors de la construction, avant la fermeture des chambres de décharge.

D'autre part, une auscultation minimale, devrait permettre de s'assurer que — en dépit de l'aspect particulièrement récent de certaines fissures — l'ouvrage ne présente pas d'évolution pouvant affecter sa stabilité. Pour l'instant seuls une dizaine de témoins de plâtre ont été mis en place.

Si, compte tenu de tous ces éléments, il ne s'avérait pas possible d'expliquer toutes les déformations observées, il serait possible d'envisager dans le modèle, une ou plusieurs cavités pour en déterminer les effets sur le comportement de la structure. Il est en effet très probable, qu'une seconde chambre, telle que celle qui a été envisagée par les architectes aurait une influence significative sur les déformations des différentes chambres.

L'analyse géomécanique de la structure permettrait-elle également de mettre en évidence l'existence de cavités proches ?

Les données et les méthodes actuelles utilisées à E.D.F. permettent de l'espérer.

M. Le PRÉSIDENT

Merci beaucoup M. Deletie. Les mortiers de Meidoum étaient à base d'argile et de poudre calcaire, donc à prise très lente. Khéops a peut-être été le premier à utiliser des mortiers au gypse, à prise très rapide. L'analyse par le Cerilh de mortiers de Pépi Ier à la pyramide d'Ounas, dans une dynastie postérieure, confirme l'utilisation de mortiers au gypse. C'est un point important dans l'histoire des techniques.

Avant la discussion, M. MONTLUÇON va vous dire quelques mots pour commenter ces recherches et esquisser un développement possible.

⁽¹⁾ Réalisées par le laboratoire de palynologie de Montpellier, C.N.R.S.

COMMENTAIRES sur les RECHERCHES DÉVELOPPEMENT POSSIBLE

par Jacques MONTLUÇON

Cette opération était, vous l'avez vu, pluridisciplinaire. Mais dès lors, quelles sont aujourd'hui les perspectives techniques ouvertes par ces premières investigations ? Leurs potentialités sont grandes :

S'agissant de géomécanique, la simple observation peut être complétée par le calcul. Pour apprécier la situation de la structure constituée par l'ensemble des chambres de décharge, on peut envisager d'utiliser les codes de calcul employés pour l'étude de la stabilité des ouvrages souterrains à E.D.F. (code Ali Baba). Une telle analyse devrait permettre de mieux comprendre l'importance des fissures observées et la dissymétrie de leur localisation.

S'agissant de microgravimétrie, de nouvelles applications se dégagent, art et science. La pertinence de la microgravimétrie dans la recherche des cavités a été démontrée sur la deuxième barque solaire. Cette observation conforte celle effectuée dans le couloir de la Reine où le signal mesuré est d'un ordre de grandeur comparable (amplitude moitié). Mais au-delà de la simple recherche de cavités, la microgravimétrie permet, par l'analyse fine des termes résiduels représentatifs de l'influence de la Pyramide, d'accéder à une évaluation de la densité moyenne du monument. Cette manière originale de « peser la pyramide » est peut-être le résultat le plus important, le plus porteur d'avenir de notre analyse. Avec la microgravimétrie, on dispose désormais d'une méthode d'appréciation globale des structures qui peut permettre des analyses comparatives intéressantes de différents monuments antiques.

Ainsi, au-delà des objectifs impartis, les méthodes que nous avons proposées et mises en œuvre avec l'accord et la collaboration constante de nos partenaires égyptiens ont ouvert des horizons nouveaux. Bien entendu, il ne s'agit pas de méthodes miraculeuses mais d'une étape de plus dans l'analyse scientifique des édifices de l'ancienne Égypte (fig. 24).

*
* *

La démarche que nous avons suivie avait pour seule ambition de s'inscrire strictement dans la double perspective suivante :

- Le souci d'E.D.F. de développer une politique de mécénat technologique en mettant ses outils au service du secteur culturel.

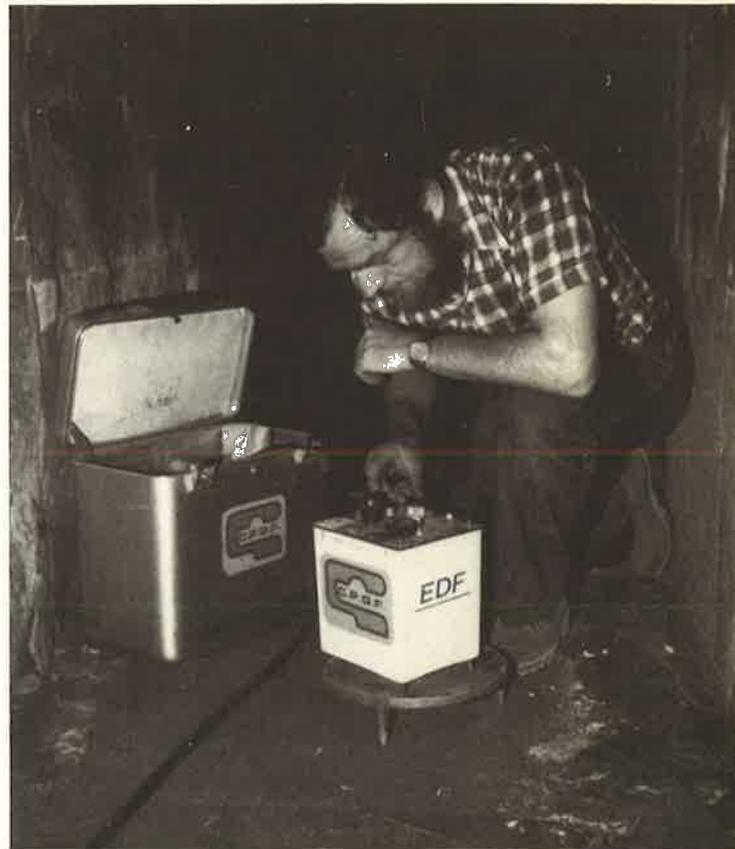


Fig. 24. — Mesures gravimétriques.

- Le souhait du Président Kadry de situer cette opération sur le terrain d'une mise à l'épreuve dans un contexte archéologique de techniques scientifiques nouvelles.

J'espère que nous y sommes parvenus.

DISCUSSION

M. le PRÉSIDENT. Je remercie bien vivement les conférenciers et j'ouvre la discussion.

Dr. Suzanne CORON (*Laboratoire de Tectonophysique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI*). Après ce brillant exposé qui nous a fait survoler le temps et nous a montré l'utilisation de la « microgravimétrie » pour la recherche de vides ou de structures de densité différente, j'aimerais demander quelques informations aux observateurs, véritables « artistes » de terrain, sur le mode opératoire et la précision obtenue.

1) Combien de temps faut-il pour effectuer une mesure isolée ? Combien de temps s'écoule avant le retour à une base de référence ? Quelle est la précision moyenne d'une mesure de g , l'écart de fermeture ?...

2) Parmi les nombreuses corrections que vous avez citées et qui s'ajoutent aux valeurs de g mesurées, je n'ai pas entendu nommer celle de « l'effet luni-solaire » qui est très variable et nécessite une bonne connaissance de l'heure et parfois des réactions locales, car le gradient peut atteindre 0,001 mgal à la minute.

M. Jean Claude ERLING. Il faut une ou deux minutes pour effectuer une mesure isolée. Les retours à la base sont effectués toutes les demi-heures environ. La lecture est faite au microgal, et la répétabilité, écart entre 2 lectures faites à des dates différentes, de l'ordre de 5 microgals.

La correction luni-solaire a été bien entendu effectuée en Égypte, à l'aide d'un micro-ordinateur HP85.

M. Antoine BOUVIER (*Compagnie Générale de Géophysique*). Quelle était la raison du choix de la microgravimétrie, de préférence à d'autres méthodes géophysiques ? A-t-on envisagé d'utiliser le radar ?

M. Jacques LAKSHMANAN. Avant d'entreprendre la campagne microgravimétrique, nous avons passé en revue toutes les méthodes géophysiques. Le radar a effectivement retenu notre attention, mais a finalement été rejeté pour des raisons d'encombrement, de coût, et de manque de précédents dans un matériau composite comme celui constituant la pyramide.

Voix dans la salle. A-t-on envisagé la sismique lourde ? (*Rires dans l'assistance...*)

M. Jacques LAKSHMANAN. Nous devons rester non destructifs...

M. Albert HESSE (*Centre de Recherches Géophysiques à Garchy, C.N.R.S.*). Le réseau topographique des stations sur lesquelles ont été implantées les mesures gravimétriques a certainement été établi avec grand soin. Qu'en est-il du relevé architectural des volumes de vide qui ont servi à calculer les corrections : a-t-il été refait avec la même précision ou vous êtes vous servi de relevés préexistants ? Dans ce dernier cas les avez-vous vérifiés et dans l'affirmative, pouvez-vous préciser l'incidence des erreurs éventuelles sur vos résultats gravimétriques.

M. Jacques LAKSHMANAN. La digitalisation des formes des cavités connues a été répétée deux fois pour contrôler leur précision. Par exemple, la grande galerie a été divisée en 39 prismes. Les corrections maximales dues à ces cavités s'élèvent à près de 200 microgals ; l'écart entre les 2 digitalisations ne dépasse jamais 15 microgals.

De plus, pour réduire l'influence des erreurs sur ces corrections, et particulièrement en différentiel entre deux points proches, les points situés à proximité de grands murs verticaux ont été placés à une distance rigoureusement constante de ces murs. C'est le cas de la Chambre du Roi et des parois extrêmes Nord et Sud de la grande galerie.

Professeur Albert TARANTOLA (*Institut de Physique du Globe de Paris, Université de Paris VI*). Il n'a été question que des données gravimétriques. Or le problème inverse gravimétrique a une solution non unique. De quelles informations *a priori* disposez-vous pour espérer trouver quelque chose au bout de ces forages relativement courts ?

M. Jacques LAKSHMANAN. L'inversion de données gravimétriques est effectivement non unique. Néanmoins, compte tenu de la forme de l'anomalie du couloir d'accès à la Chambre de la Reine, on savait que la cause était sous le côté Oucst et située à faible distance. Ceci corroborant les idées des architectes, ce sont ces idées qui ont permis d'implanter les forages et d'en définir longueur et inclinaison.

M. Alain GACHET, ingénieur géophysicien (*Société Nationale Elf-Aquitaine, SNEA (P)*). Les vides actuellement connus dans la pyramide de Khéops constitués par les chambres du Roi, de la Reine, ainsi que par les galeries d'accès, sont tous situés dans un plan de symétrie passant par le sommet de la pyramide.

Toutes les mesures gravimétriques à l'intérieur de la pyramide n'ont donc pu se faire que dans ce plan, sans déport latéral vu l'étroitesse des couloirs.

Dans quelle mesure cette contrainte pénalise-t-elle votre approche destinée à repérer d'autres cavités qui pourraient se situer tant, dans ce même plan de symétrie, qu'en dehors ?

M. Jacques LAKSHMANAN. Il est certain que les mesures réalisées ne permettent que d'explorer les abords immédiats des galeries prospectées. Il reste encore d'autres zones à explorer (grande galerie, galerie d'accès et l'extérieur de la pyramide). Cependant même avec d'autres mesures, il restera malheureusement d'autres zones d'ombre.

M. Vincent TARDIEU, journaliste à *Libération* est intervenu à trois reprises. Tout d'abord, il demande des précisions sur la nature du sable trouvé par les sondages (*voir question suivante de M. Lauer et réponse de M. Deletie*).

Il demande ensuite des précisions sur la position des cavités.

M. Jacques LAKSHMANAN. Les mesures gravimétriques, limitées par l'exiguïté de la galerie ne permettent qu'une localisation grossière de la cause : l'anomalie de masse se situerait à l'Ouest de la galerie d'accès à la Chambre de la Reine, et au moins partiellement, sous la cote de cette galerie.

M. Vincent TARDIEU (*3^e question*) s'adressant à M. Lauer et à Mme Desroches-Noblecourt, demande quel rôle le sable a-t-il pu jouer, et notamment dans les autres pyramides. Il se réfère en particulier à la possibilité d'utilisation du sable pour faire descendre des blocs de fermeture.

Il s'instaure ensuite une large débat entre les égyptologues et les architectes, dont la teneur ressort des communications écrites de M. Jean-Philippe Lauer et de M. Jean-Patrice Goidin.

M. Jean-Philippe LAUER, Directeur de Recherche Honoraire au C.N.R.S., membre correspondant de l'Institut des Inscriptions et Belles Lettres demande tout d'abord des précisions sur les

caractéristiques du sable recueilli par les forages effectués à partir du couloir de la chambre appelée à tort « de la Reine ».

M. Pierre DELETIE. Le sable rencontré en forage est un sable à dominante quartzreuse très bien classé. L'examen microscopique montre qu'il a une origine éolienne certaine ; toutefois les dépôts et concrétions récents sur les grains n'ont pas encore permis de déterminer si les grains présentaient également une usure fluviale secondaire.

M. J.-Ph. LAUER (*deuxième intervention*). Cela ne me surprend pas, car tel est bien le sable qui fut généralement utilisé pour le mortier des massifs des pyramides. Du sable en quantité abondante devait ainsi être monté sur la pyramide au fur et à mesure de sa construction, et il est normal qu'on en ait employé au comblement des espaces réduits laissés libres (pour les manutentions nécessaires et la pose du gros blocs des parois de calcaire dur de Tourah du couloir de la Chambre de la Reine) de part et d'autre entre ce couloir et le massif même de la pyramide, constitué de gros libages du calcaire local. Mais, d'autres matériaux ont pu avoir également servi à ce comblement, par exemple des briques crues d'échafaudages ou des déchets de taille de pierres, dont la densité pouvait être inférieure à celle du sable ; quelques vides ont pu même y avoir été laissés par endroits, lorsque de gros blocs formant linteaux furent jugés là suffisamment solides et stables.

Par ailleurs, la nécessité d'établir des magasins en ce point ne s'imposait guère. Nous n'en connaissons pas dans les deux grandes pyramides de Dahchour édifiées pour Snéfrou, le père de Khéops, et pas davantage dans celle de son fils Khéphren à Guizéh. De plus, les 55 m² de surface de la Chambre sépulcrale de Khéops permettaient d'y emmagasiner un important mobilier et il eût été possible également d'utiliser à cette fin la Chambre dite « de la Reine ».

En ce qui concerne l'emploi du granite pour l'ensemble de la Chambre sépulcrale de Khéops, j'ai insisté sur le fait que ses architectes ignorant, bien entendu, la statique et la résistance des matériaux, procédèrent empiriquement ; ils ont ainsi manifestement préjugé des qualités de cette roche nettement plus dure que le calcaire de Tourah, mais manquant d'homogénéité, ce qui la rend impropre à la flexion. Ils ont pensé qu'avec une pierre aussi dure, on pouvait éviter de couvrir la Chambre sépulcrale par des blocs disposés en chevrons, comme ils l'avaient fait ailleurs. Fort surpris de constater les fissures qui se produisirent probablement dès la pose de ces énormes poutres pesant de 50 à 70 tonnes, ils pensèrent y remédier en construisant les chambres dites de décharge, et durent finalement se résoudre, après en avoir superposé quatre, couvertes de même façon, et constaté à chacune que les poutres se fissuraient, à couvrir l'ensemble par une vraie voûte de décharge, constitué d'énormes dalles de calcaire disposées en chevrons, comme sur la « Chambre de la Reine ».

Mme Christiane DESROCHES-NOBLECOURT, *Inspecteur Général Honoraire des Musées de France* pose ensuite une série de questions aux architectes concernant les raisonnements qui les ont conduits à supposer l'existence d'autres chambres.

M. Gilles DORMION et Jean Patrice GOIDIN, *architectes*, font part de leur point de vue sur l'opération. Après la conférence, ils ont communiqué le texte suivant :

« C'est en Décembre 1985 que les Architectes Dormion et Goidin ont soumis au Ministère des Affaires Étrangères, une étude basée sur une analyse de détails des différentes anomalies de construction dans la Grande Pyramide de Khéops. Cette étude aboutissait sur des propositions théoriques impliquant la présence de circulations et de cavités inconnues jusqu'à ce jour. M. Philippe Guillemain directeur des Sciences Sociales et Humaines du Ministère organisa deux missions préparatoires : en Février 1986, un relevé complet et précis de toutes les circulations existantes fut réalisé avec les moyens les plus modernes, et en Avril 1986 une vérification et des recherches d'indices furent entreprises. Après des travaux de déblaiements de l'entrée les architectes mirent à jour un appareillage et une disposition de fermeture inconnue jusqu'à ce jour.

Au vue des résultats encourageants, les architectes proposèrent une investigation géophysique douce microgravimétrie, radar ou électro-acoustique pour confirmer, si possible, la présence réelle de ces cavités.

E.D.F., dans un but de mécénat, s'associa à cette recherche et désigna le C.P.G.F., une compagnie de prospection géophysique par microgravimétrie.

Des anomalies de densité furent décelées dans le couloir horizontal menant à la Chambre de la Reine, à l'emplacement désigné par les architectes. En Août 1986, une campagne plus conséquente fut menée qui confirma et amplifia les résultats précédents. Au vue des résultats de microsondages, les architectes semblent avoir défini la localisation sinon la nature de cette cavité.

Pour les autres cavités recherchées, rien n'a été encore entrepris. Pour la confirmation de la 2^e entrée et d'un second couloir parallèle au premier, celui-ci devrait être probablement formé par des bouchons en granite et comblé comme dans toutes les pyramides similaires ; un autre procédé que la gravimétrie devrait être probablement choisi.

En ce qui concerne la présence possible d'une cavité au voisinage de la Chambre du Roi située à 8,50 m au minimum de celle-ci aucune anomalie n'a été enregistrée par microgravimétrie.

Les architectes déposeront le rapport architectural très prochainement au Ministère des Affaires Étrangères ».

Mme Frédérique GACHET, *journaliste au « Figaro »*. Les anomalies gravimétriques enregistrées par C.P.G.F. semblent corrélées celles décelées au plan architectural par les deux architectes dans la grande galerie.

Les micro-forages n'ont pas encore atteint leur objectif et se sont arrêtés en cours pour des raisons techniques. Quand recommencerez-vous les travaux de sondage ?

M. Claude BIENVENU, *Directeur des Études et Recherches, Électricité de France*, précise que si le Service des Antiquités Égyptiennes en faisait la demande, Électricité de France pourrait envisager de poursuivre les recherches.

CONCLUSION du PRÉSIDENT

Un Président doit s'efforcer de conclure. Des exposés et discussions, je dégagerais volontiers les cinq points suivants :

1° la qualité de l'habillage extérieur ne correspond pas du tout à celle du volume interne de la pyramide, comme le démontre la densité moyenne beaucoup plus faible qu'on ne pouvait l'imaginer. Derrière une carapace épaisse et dense, le volume interne comporterait des pierres tendres, en bas de l'échelle de la densité des pierres, avec peut-être une multiplicité de petits vides dans l'assemblage des pierres qui furent à peine ébauchées pour économiser la main-d'œuvre, ce qui est assez raisonnable au regard de la brièveté de la vie d'un pharaon et de l'usure des scies en cuivre servant à la taille des pierres. Deuxième hypothèse, elle comporterait des cavités remblayées par du sable. Troisième hypothèse, elle comporterait une structure hétérogène, feuilletée probablement, avec à la fois des calcaires compacts et tendres et des vides notables, sans que ces hypothèses soient exclusives l'une de l'autre

2° La faible densité mesurée est de nature à expliquer l'état inquiétant de la Chambre du Roi. Une structure très rigide et haute insérée dans une structure beaucoup plus compressible attire sur elle des charges considérables. Il y a là manifestement une erreur de conception.

3° L'une des raisons pour lesquelles, en dépit de ce qui précède, la pyramide est parvenue jusqu'à nous en bon état, est l'emploi par Khéops, pour la première fois semble-t-il, de mortier au gypse dont la prise très rapide a diminué considérablement les poussées au vide.

4° Tout ceci n'est encore qu'une ébauche de radiographie de la structure. Il reste à faire un choix de différents schémas de structure, compatibles avec la densité moyenne, dont la microgravimétrie dira, conjointement avec quelques vérifications directes, quel est celui d'entre-eux qui s'approche le plus de la réalité (1).

5° Toute vérification directe (sondages, galeries ...) appelle au préalable la consolidation de la Chambre du Roi, après peut-être étude par un programme genre Ali Baba, programme de calcul de stabilité d'Électricité de France.

Félicitons E.D.F. et C.P.G.F. de tous ces premiers résultats, et souhaitons très vivement que le Comité des Antiquités Égyptiennes accueille prochainement une proposition de développement de l'opération Khéops.

(1) Une nouvelle campagne microgravimétrique a effectivement été réalisée en février 1987.

**Ce que vous trouverez
dans ce fascicule :**

**ASPECTS TECHNIQUES ET PHYSIQUES
DE L'OPÉRATION KHÉOPS**

Il s'agit ici d'une présentation par les intervenants mêmes des méthodes mises en œuvre par une équipe française pour ausculter la grande pyramide de Khéops au cours de deux missions qui ont eu lieu en Mai et Octobre 1986.

Ces méthodes devaient apporter un support expérimental et scientifique aux analyses d'ordre architectural effectuées préalablement.

Ont ainsi pu être réalisés :

- des mesures microgravimétriques,
- un examen approfondi, comportant des études géomécaniques des chambres de décharge et de la Chambre du Roi,
- des microforages dans le couloir de la Reine.

Des personnalités de tous horizons : égyptologues, architectes, historiens, géographes, ingénieurs de disciplines variées, correspondants de presse assistaient à cette présentation et ont amplement participé aux débats particulièrement animés.

**TECHNICAL AND PHYSICAL ASPECTS
OF THE KHEOPS OPERATION**

This article is a presentation by the French team of the methods they used to examine the Kheops pyramid during two assignments in May and October 1986.

These methods should provide an experimental and scientific basis to the architectural analyses carried out previously.

The following operations were undertaken :

- microgravimetric measurements,
- thorough examination including geomechanical studies of the storage chambers and the King's chamber,
- microsoundings in the Queen's corridor.

Experts from all backgrounds : Egyptologists, architects, historians, geographers, engineers in various fields, press correspondents... attended this presentation and participated in the particularly animated discussion.

**TECHNISCHE UND PHYSIKALISCHE ASPEKTE
DER OPERATION CHEOPS**

Hier stellen die Beteiligten selbst die von einem französischen Team eingesetzten Methoden zur Untersuchung der großen Cheops-Pyramide im Verlaufe zweier Missionen im Mai und Oktober 1986 vor.

Die Verfahren sollten früher durchgeführte Analysen der architektonischen Durchbildung experimentell und wissenschaftlich unterstützen.

Es konnten im einzelnen durchgeführt werden :

- mikrogavimetrische Messungen,
- eine gründliche Erforschung einschließlich geomechanischer Untersuchung der Entlastungskammer und der sogenannten Königskammer,
- Mikrobohrungen im Gang der Königin.

Persönlichkeiten aus allen Disziplinen : Ägyptologen, Architekten, Historiker, Geographen, Ingenieure verschiedenerer Fachrichtungen, Pressekorrespondenten nahmen sowohl an den Vorträgen als auch an den äußerst angeregten Diskussionen teil.

**ASPECTOS TECNICOS Y FISICOS
DE LA OPERACION KHEOPS**

Se trata a continuación de una presentación por los mismos actores de los métodos a los que ha recurrido un equipo francés para auscultar la gran pirámide de Khéops en el transcurso de dos misiones que fueron llevadas a cabo en mayo y en octubre de 1986.

Estos métodos habían de traer un fundamento experimental y científico a los análisis de tipo arquitectónico llevados a cabo previamente.

Así han podido llevarse a cabo :

- medidas microgravimétricas,
- un examen profundizado, que incluye estudios geomecánicos de las cámaras de descarga y de la cámara llamada del Rey,
- microperforaciones en el Pasillo de la Reina.

Presenciaban esa presentación personalidades de todas las profesiones : egiptólogos, arquitectos, historiadores, geógrafos, ingenieros de disciplinas variadas, corresponsales de prensa : han tomado parte de manera notable a los debates particularmente animados.

Les thèses et la méthode d'exposition adoptées par les auteurs peuvent parfois heurter certains points de vue habituellement admis. Mais il doit être compris que ces thèses, à l'égard desquelles l'Institut Technique ne saurait prendre parti, ne visent en rien les personnes ni le principe des Institutions.

© 1987 by S.E.B.T.P. (S.A.R.L.).