

EGYPTE ARCHITECTURE

Ière Partie évolution du mastaba à la pyramide de Khéops

Avant d'aborder l'étude des pyramides, il est indispensable de rappeler d'où viennent les Egyptiens. Il faut remonter le temps bien au-delà des premières dynasties et des pyramides !!!

Ils apparaissent, en effet, au Paléolithique, dans la vallée du Nil, (Pléistocène, acheuléen) il y a 300 000 ans au milieu de la 2° période interglaciaire alpine (Mindel-Riss): ils développent alors une industrie lithique signalée par la présence de bifaces, et ce du Caire à Khartoum.

Le climat est humide pendant 30 000 ans dans la région du Caire (entre 120 000 et 90 000 ans), avec des lacs et des savanes peuplés d'une abondante et variée faune de rhinocéros, éléphants, équidés, antilopes, poissons tilapia...).

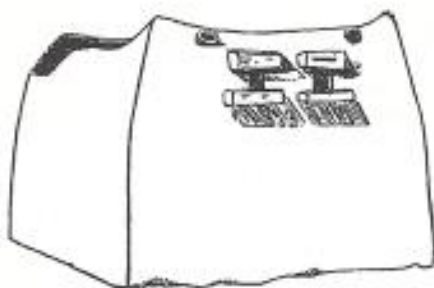
Les peuplades présentes étaient des chasseurs-cueilleurs-pêcheurs qui parcouraient plusieurs centaines de kms par an en suivant les grands troupeaux d'herbivores.

5 000 ans avant nous (le prédynastique), une pulsation humide entraîne la remontée des lacs sahariens et de la nappe phréatique, les températures sont élevées. Puis, l'aridité s'installe et les hommes rejoignent le Nil. Les nouveaux occupants, néolithiques sont des pasteurs, de l'Atlantique à la Mer Rouge.

Leurs constructions sont alors de simples maisons en terre cuite avec de petites fenêtres haut placées pour se protéger des bêtes féroces.



Modèle réduit de maison en terre cuite de type pharaonique. Forme rectangulaire plus large à la base : murs convexes. Porte avec linteau en bois.



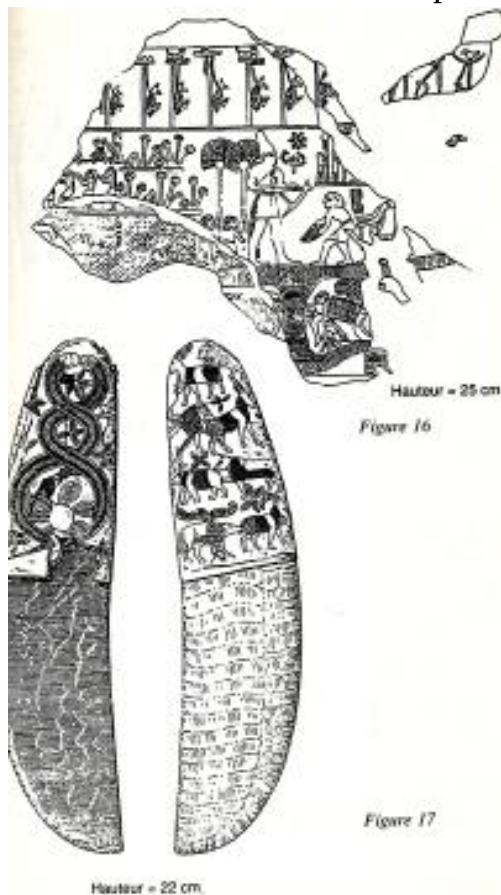
Deux fenêtres jumelles à linteaux haut-placées.

PREDYNASTIQUE

Le désert s'installant progressivement, ils quittent le Sahara pour s'installer définitivement sur les bords du Nil.

C'est vers - 3 200 que l'on constate deux phénomènes importants :

- L'abandon du pastoralisme, et l'apparition soudaine, voir ci-dessous, d'un roi, le roi scorpion, présidant à une cérémonie de mise en eau d'un canal d'irrigation, impliquant une structure sociale et une ingénierie agricole déjà très avancées !
- La découverte d'un couteau d'inspiration mésopotamienne qui témoigne de relations entre la Mésopotamie, et l'Egypte.



Abandon du pastoralisme et du désert pour le Nil.

- **le roi scorpion**, - 3 200 ? armé d'une houe, ouvre en grande cérémonie un canal d'irrigation.

-C'est le début de l'irrigation et de l'agriculture intensive.

-Couteau de Djebel Tarif : d'inspiration mésopotamienne

-Avec deux serpents enlacés et des lions attaquant des gazelles.

De 3125 à 2400 avant J.C nous entrons dans la période dynastique avec l'ANCIEN EMPIRE (de la 3ème à la 6ème dynastie) qui verra la construction des pyramides.

Donc, en quelques centaines d'années, l'Egypte passe de la préhistoire à une civilisation capable de développer une vaste gamme de structures diverses et de grands monuments architecturaux le long du Nil et en particulier : les pyramides et les temples !!!

En raison de la rareté du bois (ils s'approvisionnaient dans les forêts de l'actuel Liban), les matériaux de construction prédominants utilisés dans l'Egypte

ancienne étaient la brique cuite au soleil, le calcaire, mais aussi du grès et du granit en quantités considérables.

À partir de l'Ancien Empire, la pierre fut généralement réservée aux tombes et aux temples, tandis que les briques servaient pour ériger les palais royaux, les forteresses, les murs des enceintes des temples et des villes, et les bâtiments secondaires dans les temples. Le noyau des pyramides se composait de pierres de carrières, de briques de boue, de sable ou de gravier. Pour les cuvelages ¹ont été utilisés, qui devaient être transportés de plus loin, principalement du calcaire blanc de Tura et du granit rouge de la haute Egypte.

Les anciennes maisons égyptiennes étaient fabriquées avec de la boue recueillie dans les rives humides du Nil, placée dans des moules et mise à sécher au soleil chaud pour durcir (technique encore utilisée de nos jours). Lorsque les briques étaient destinées à être utilisées dans une tombe royale comme une pyramide, les briques extérieures étaient alors finement ciselées et polies.

Beaucoup de villes égyptiennes ont disparu parce qu'elles étaient situées près de la zone cultivée de la vallée du Nil et qu'elles ont été inondées lorsque le lit de la rivière s'est lentement agrandi au cours des millénaires. D'autres sont inaccessibles, recouvertes de nouveaux bâtiments érigés sur les anciens. Heureusement, le climat sec et chaud de l'Égypte a préservé certaines structures en briques de boue. Les exemples incluent le village Deir al-Madinah, la ville du Moyen Empire à Kahun, et les forteresses à Buhen et Mirgissa. En outre, de nombreux temples et tombeaux ont survécu car ils ont été construits sur des hauteurs, non affectées par les inondations du Nil.

Ainsi, notre compréhension de l'architecture égyptienne antique repose principalement sur des monuments religieux, des structures massives caractérisées par des murs épais et inclinés avec peu d'ouvertures. Bien que l'utilisation de l'arcade ait été développée pendant la quatrième dynastie, tous les bâtiments monumentaux sont des constructions de poteaux et de linteaux, avec des toits plats construits avec d'énormes blocs de pierre soutenus par les murs extérieurs et des colonnes rapprochées.

Les murs extérieurs et intérieurs, ainsi que les colonnes et les piliers, étaient couverts de fresques hiéroglyphiques et picturales et de sculptures peintes de couleurs brillantes.

Beaucoup de motifs de l'ornementation égyptienne sont symboliques, tels que le scarabée, ou coléoptère sacré, le cobra royal, le disque solaire, et le vautour. D'autres motifs communs incluent des feuilles de palmier, de papyrus, de bourgeons et de fleurs de lotus. Les hiéroglyphes étaient inscrits à des fins décoratives ainsi que pour enregistrer des événements historiques. De plus, ces

¹ Cuvelage : mise en place d'un caisson étanche dans le sous-sol.

fresques et sculptures picturales nous permettent de comprendre comment vivaient les anciens Egyptiens, les statuts, les guerres qui ont eu lieu et leurs croyances.

Les temples égyptiens antiques ont été alignés avec des événements astronomiquement significatifs, tels que des solstices et des équinoxes, exigeant des mesures précises au moment de l'événement particulier. Les mesures effectuées dans les temples les plus importants ont peut-être été effectuées cérémonieusement par le Pharaon lui-même.

Les mastabas

Ce sont les premiers complexes funéraires (mastaba : terme arabe signifiant « terrasse/ banc »).

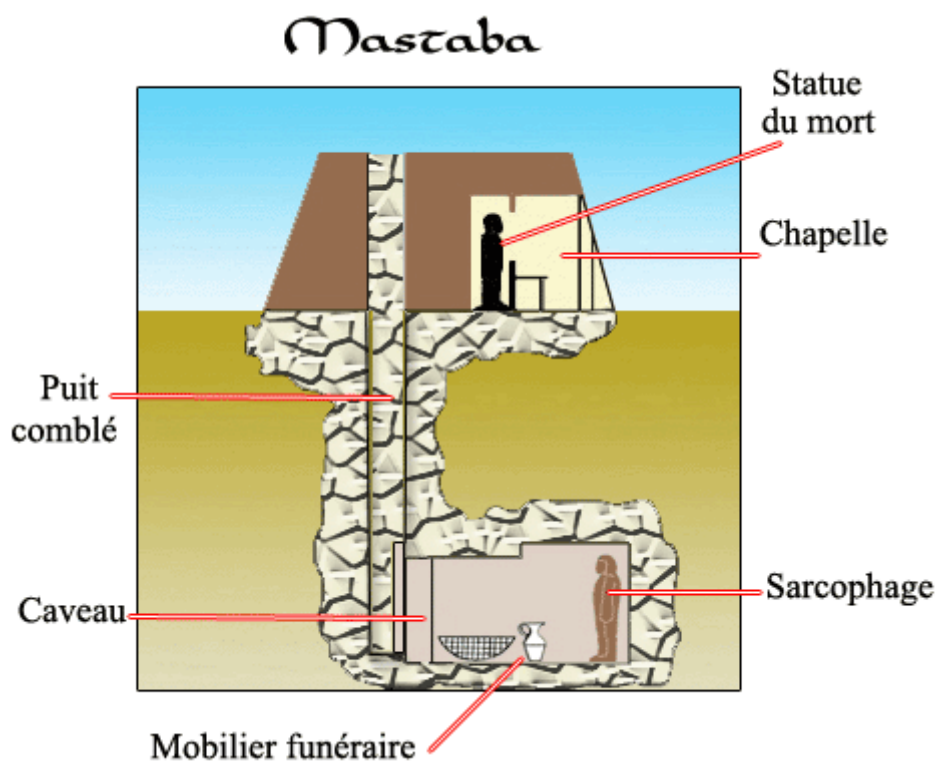
Avant la III^{ème} dynastie, les pharaons étaient enterrés dans de grands mastabas, de grandes tombes rectangulaires (analogues à nos tombeaux actuels), à moitié enfouis dans le sol. La tombe elle-même était placée au fond d'un puits partant du centre de l'édifice.

Le complexe funéraire de Khéops se trouve être lui-même au centre d'une vaste nécropole (l'une des plus vastes de la Basse-Égypte) composée de mastabas et de tombes ayant appartenu à des hauts fonctionnaires et des membres de la famille royale contemporains du règne de Khéops et d'autres un peu plus tardives de la IV^e à la VI^e dynastie.

Le mastaba, contemporain de Khéops, suit un plan normalisé décrivant une substructure composée d'un puits vertical aboutissant à une chambre funéraire et une superstructure rectangulaire en pierres calcaires dans laquelle était aménagé un lieu de culte funéraire indiqué par une stèle fausse-porte protégée par une chapelle funéraire.



Mastaba d'Idou à Gizeh



Ces mastabas étant régulièrement pillés furent remplacés par des structures colossales, les pyramides, dans lesquelles la dépouille du pharaon était en principe mieux protégée.

Les Pyramides

La pyramide de Saqqarah.

L'observation des premiers complexes funéraires d'Abydos ou de celui du roi Djéser à Saqqarah permettent de restituer l'organisation générale des temples des premières dynasties.

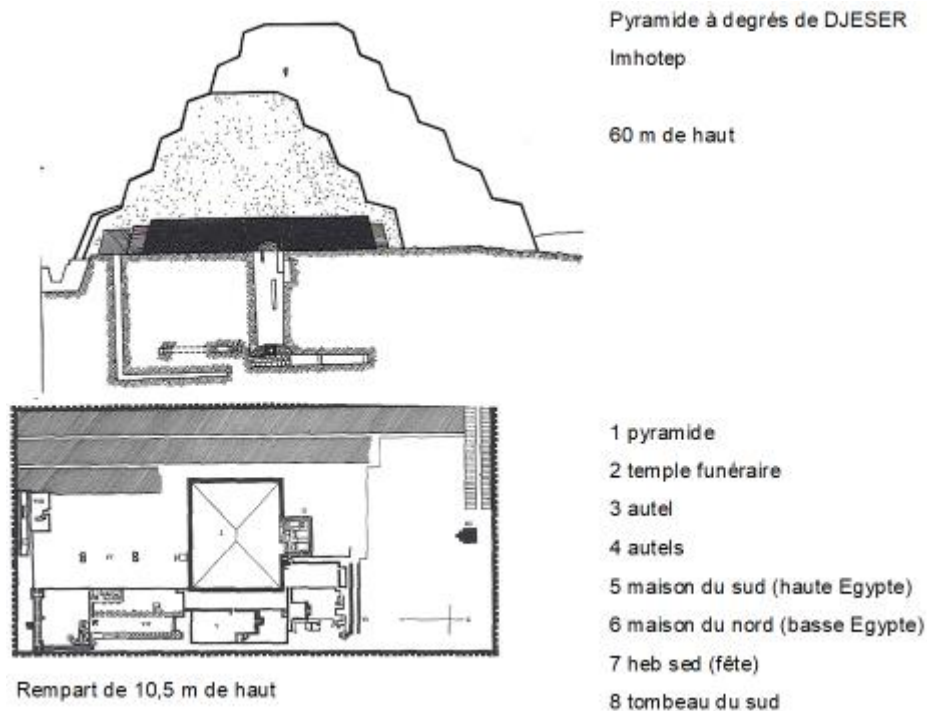


La pyramide de Djoser à Saqqarah

Une enceinte rectangulaire est percée de portes à l'extrémité d'un de ses côtés, par lesquelles on accède au complexe. Cette structure est bien visible à Saqqarah. C'est grâce aux complexes funéraires que l'on peut retracer l'évolution de l'architecture des temples égyptiens.

Un important changement a lieu pendant cette période : les constructions qui autrefois se faisaient en briques crues se font dorénavant en pierre de taille. Les blocs du complexe funéraire de Djéser sont relativement petits et rappellent la période de transition entre la maîtrise des gros volumes de pierres et celle des petits volumes de briques.

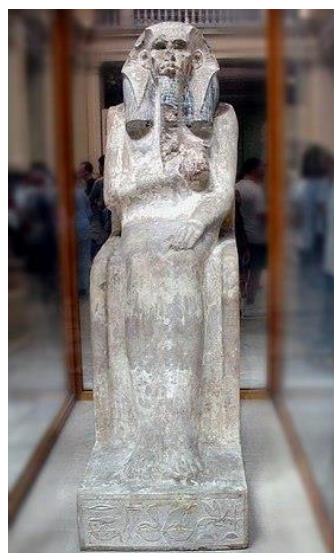
Il est probable que cette modification se soit faite après la prise de conscience des égyptiens de la périssabilité des briques non cuites et l'affirmation d'une religion dans laquelle la conservation du corps pour l'éternité est une des composantes importantes.



La pyramide à degrés de Saqqarah est le lieu le plus important du complexe funéraire du pharaon. Elle fut construite par **Imhotep** - le premier architecte de l'histoire - pendant le règne du pharaon **Djéser**, sous la III^e dynastie, vers l'an 2630 avant notre ère.²



Statue d'Imhotep (Louvres)



Roi Djéser

² Imhotep : sur le socle d'une statue du roi Djéser (aujourd'hui au Musée du Caire), il est présenté comme « Le chancelier du roi de Basse-Égypte, le premier après le roi de Haute-Égypte, administrateur du grand palais, noble héréditaire, grand prêtre d'Héliopolis, constructeur de Saqqarah, sculpteur ».

Outre l'enceinte et les bâtiments annexes, le complexe dut initialement comporter une sépulture sous la forme d'un mastaba classique. L'architecte fit preuve d'innovation en composant intégralement l'édifice en pierre calcaire. La construction de ce mastaba de taille ordinaire marqua une évolution de l'architecture monumentale, c'est le premier monument entièrement édifié en pierre de taille. Constitué de lits de pierres horizontaux, le corps fut rempli de libages de calcaire et le parement construit en calcaire de Tourah.

L'architecte décida ensuite d'étendre la base du monument de huit coudées supplémentaires sur les quatre côtés, le rajout étant légèrement plus bas que le toit du premier qui fut agrandi une deuxième fois mais cette fois-ci seulement sur son côté Est.

Onze puits furent alors creusés au niveau de cette portion supplémentaire. Leur profondeur atteint trente-trois mètres. Ils donnent chacun sur une galerie creusée à l'horizontale et s'étendant sur une vingtaine de mètres. Les cinq premières galeries furent destinées à ensevelir des membres de la famille royale et furent pillées dès l'Antiquité, mais il reste encore deux sarcophages d'albâtre de belle facture.

De nombreux fragments de cercueil, de vaisselles et de bijoux ont été retrouvés mais la plus importante découverte fut effectuée dans les six autres galeries encore inviolées. Des dizaines de tonnes de vaisselles et de poteries datant des deux premières dynasties remplissaient complètement les galeries. Bien qu'une grande majorité des objets furent détruits à la suite de l'affaissement des plafonds, cette découverte capitale a permis de mesurer combien cet art était développé durant la période thinite.

À la suite de l'achèvement du mastaba, l'architecte imagina une sépulture aux dimensions plus ambitieuses et à la symbolique issue à la fois du culte solaire et de la conception de l'au-delà des anciens égyptiens. Un escalier permettant au pharaon d'accéder au monde divin était désormais figuré par **une pyramide à quatre gradins, de forme oblongue, enveloppant totalement le mastaba initial**. Elle fut agrandie deux fois par tranches additionnelles en lits déversés atteignant les dimensions colossales pour l'époque. L'inclinaison de chaque gradin est d'environ 84°7.

La pyramide mesure 140 mètres de long, 118 mètres de large et 60 mètres de haut. Elle est constituée de petits blocs de calcaire.

L'enceinte fut modifiée et agrandie. Son plan rectangulaire initial couvrait une aire de 240 × 400 mètres.



Vue de l'enceinte à redans

L'enceinte à redans, d'une hauteur originelle de 10,50 mètres (vingt coudées), s'étendait du nord au sud sur 544 mètres et de l'est à l'ouest sur 277 mètres, couvrant ainsi une surface totale de quinze hectares. Celle-ci ne comportait pas moins de 211 bastions régulièrement répartis sur tout son périmètre. Le mur d'enceinte supportait également un chemin de ronde sur tout son périmètre.

L'ensemble du complexe funéraire de Djéser est ceint d'un fossé large de quarante mètres et long du nord au sud de plus de 750 mètres. À l'heure actuelle, les fouilles n'ont pu le dégager que sur une profondeur de cinq mètres, sans avoir déterminé la profondeur totale. La fonction symbolique de cet élément défensif est encore inconnue (fossé bordant la forteresse figurée par le mur d'enceinte ?).



Chapelles disposées à l'ouest de la cour du Heb-Sed ³



Colonnes du corridor vues de la cour sud

³ Dans l'Égypte antique, la fête du Heb-Sed était la fête de jubilé célébrée traditionnellement à partir de la trentième année de règne d'un pharaon. Elle fait partie de la tradition pharaonique qui débute avec les premières dynasties et perdure au moins jusqu'à la XXII^e dynastie.

Cette disposition et l'ornementation par panneaux des faces extérieures du mur rappellent de très près les tombeaux de la période thinite. Les dimensions des pierres employées ici sont d'ailleurs pour la plupart approximativement les mêmes que les briques employées en maçonnerie durant la III^e dynastie.



Les remarquables peintures de Saqqarah

Une fois le principe de la pyramide adopté par les souverains égyptiens comme monument funéraire, les techniques de constructions se modifient et les Egyptiens de l'époque apprennent alors à manier de plus gros volumes. Si ces volumes se retrouvent très bien dans les dalles des chambres de décharge de la pyramide de Khéops, mais également dans les voûtes de soutien des pyramides à texte, ils n'y sont pas moins présents dans les temples proprement dits. Ainsi, les temples bas et haut de la pyramide de Khephren sont-ils faits d'énormes monolithes en guise de piliers.

Pyramide rhomboïdale ⁴ de Snéfrou.

L'étape suivante de l'évolution des pyramides à degrés fut l'édification par le roi Snéfrou d'une « pyramide rhomboïdale » sur le site de Dahchour.

La pyramide rhomboïdale est une étape intermédiaire entre la pyramide à degrés et la pyramide à faces lisses. La pyramide rhomboïdale est une pyramide dont les faces lisses constituent une pente à sections d'inclinaisons décroissantes en direction du sommet. La non-uniformité de cette pente pourrait s'expliquer par des difficultés architecturales et par l'instabilité de la maçonnerie de la pyramide. Ce type de pyramide est la dernière étape menant au stade ultime de l'évolution des pyramides d'Égypte vers les pyramides à faces lisses de la IV^e dynastie (vers - 2573 à - 2454).

⁴ Un rhomboïde est un parallélogramme dans lequel les côtés adjacents sont de longueurs inégales et les angles ne sont pas à angle droit.



Pyramide rhomboïdale.

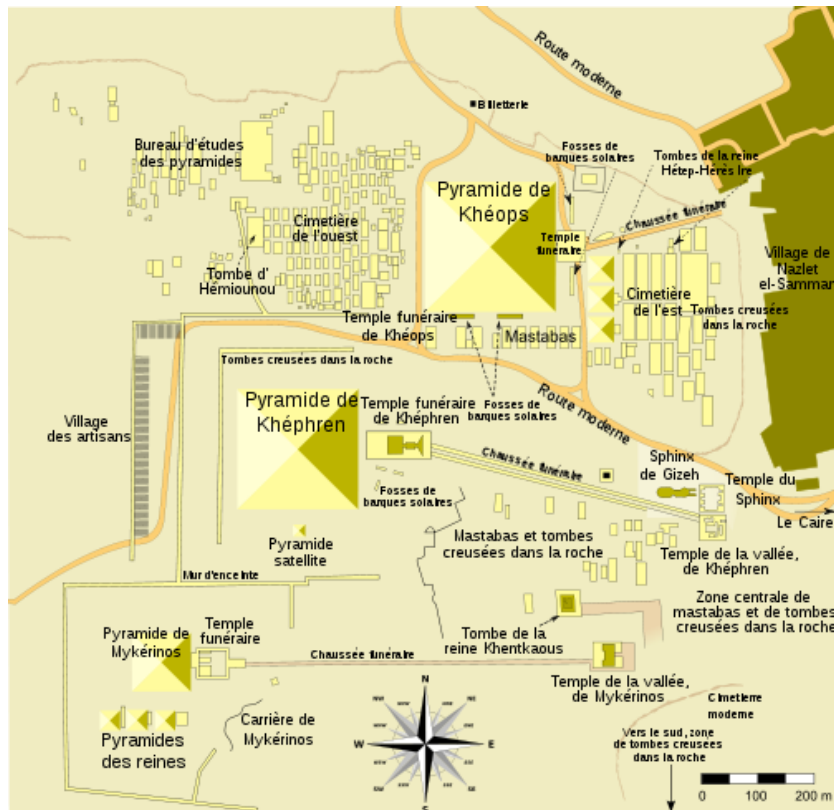
Le Complexe pyramidal de Gizeh

La nécropole de Gizeh se dresse sur le plateau de Gizeh, à la périphérie du Caire, en Égypte. Ce complexe de monuments anciens est situé à environ 8 kilomètres à l'intérieur des terres dans le désert de la vieille ville de Gizeh sur le Nil, à environ 20 kilomètres au sud-ouest du centre-ville du Caire.



Vue aérienne des pyramides de Gizeh

Cette nécropole égyptienne antique se compose de la Pyramide de Khéops, de la Pyramide de Khephren et de la Pyramide de Mykérinos, avec un certain nombre de petits édifices satellites, connus sous le nom de « reines » pyramides, le Grand Sphinx ainsi que quelques centaines de mastabas, et des chapelles.



Site de Gizeh

La pyramide de Khéops

Tombeau présumé du pharaon Khéops, elle fut édifée il y a plus de 4 500 ans, sous la IV^e dynastie, au centre du complexe funéraire.

La construction de la « grande pyramide » aurait débuté entre -2600 et -2550 suivant les sources, au début de la IV^e dynastie, et aurait duré environ une vingtaine d'années selon l'historien antique Manéthon, durée validée par les égyptologues, parce qu'elles correspondent aux vingt-trois à vingt-cinq années, suivant les sources, du règne du pharaon Khéops.

Quelques chiffres vertigineux !!!

On a du mal à réaliser que, tout juste sortis de la préhistoire, les nilotiques aient réussi le tour de force de créer une « civilisation », à la fois structurée socialement et religieusement, qui perdurera pendant près de trois millénaires et qui témoignera d'une technologie à ce point stupéfiante, compte tenu de leurs connaissances en mathématiques, du moins celles que nous pouvons déchiffrer dans les quelques papyrus parvenus jusqu'à nous !!!

Le transport, d'Assouan jusqu'à Gizeh par le Nil, de blocs pesant des dizaines de tonnes, la perfection géométrique de l'assemblage millimétrique des blocs de granit de la chambre royale, la précision des hiéroglyphes sculptés dans ce même

granit dont étaient faits les obélisques...ne cessent d'interpeller les scientifiques qui estiment qu'ils auraient beaucoup de mal à réaliser de tels exploits techniques avec les moyens ultra modernes dont ils disposent actuellement.

La construction des pyramides, d'emblée monumentales, et de certains de leurs temples (Louksor, Karnack...) relèvent à coup sûr d'une civilisation déjà très avancée, bien que la chronologie établie par les égyptologues prouve le contraire !

Que l'on juge des exploits qu'ils surent réaliser pour la seule pyramide de Chéops, voici quelques chiffres qui laissent rêveurs :

On estime que 340 blocs étaient posés chaque jour, soit pour une durée de travail de dix heures par jour, cela signifie qu'un bloc mis en place toutes les deux minutes, ce qui aurait mobilisé, selon Hérodote, la main-d'œuvre de plus de 10 000 ouvriers : une telle performance est-elle possible ?

Ce monument forme une pyramide à base carrée de 230,5 mètres. Les valeurs empiriques d'aujourd'hui sont : au sud de 230,384 m, au nord 230,329 m, à l'ouest 230,407 m, à l'est 230,334 m.

Elle fut construite sur un socle rocheux et avait une hauteur initiale d'environ 146,58 m (280 coudées royales égyptiennes), c'est-à-dire plus haute que la basilique Saint-Pierre à Rome de 139 m, mais l'érosion l'a réduite de 9,58 m (environ dix-huit coudées royales) pour atteindre 137 m de hauteur.

Elle fait un périmètre de 922 m, une surface de 53 056 m² et un volume originel de 2 592 341 m³ (aujourd'hui 2 352 000 m³).

L'estimation traditionnelle du nombre de blocs de pierres qui composent la pyramide est de 2,3 millions. La pyramide pèse près de cinq millions de tonnes. Le volume de matériau entassé (corps et revêtement) s'élevait à 2,5 millions de m³ ; aujourd'hui, il n'en reste qu'environ 2,34 millions.

Chaque bloc de pierre calcaire (de géométrie différente !) a un volume de 1,10 m³ et pèse en moyenne 2,5 t, ce qui fait pour la pyramide (en négligeant le poids des 130 blocs de granit) une masse totale de 5 000 000 t.

Le parement ou revêtement était composé de pierres calcaires blanchâtres soigneusement jointoyées et polies qui renvoyaient les rayons du soleil, lui donnant l'aspect d'une véritable colline de lumière... Des vestiges d'une enceinte à redans, située à dix mètres autour de la pyramide, sont présents autour du monument...

Le pyramidion

Cet élément architectural qui coiffait le sommet des pyramides d'Égypte est un élément important du culte funéraire des Égyptiens. On y gravait le nom du défunt et des prières pour préparer le passage dans l'au-delà.



Pyramidion du grand intendant de Memphis Iniouia - XVIIIe dynastie

Il ne subsiste aucune trace du pyramidion qui couronnait jadis le sommet de la grande pyramide. Le pyramidion qui est exposé actuellement près du coin sud-est n'est autre que celui de la petite pyramide satellite.

Très peu de pyramidions ont survécu aux épreuves du temps ou du vandalisme.



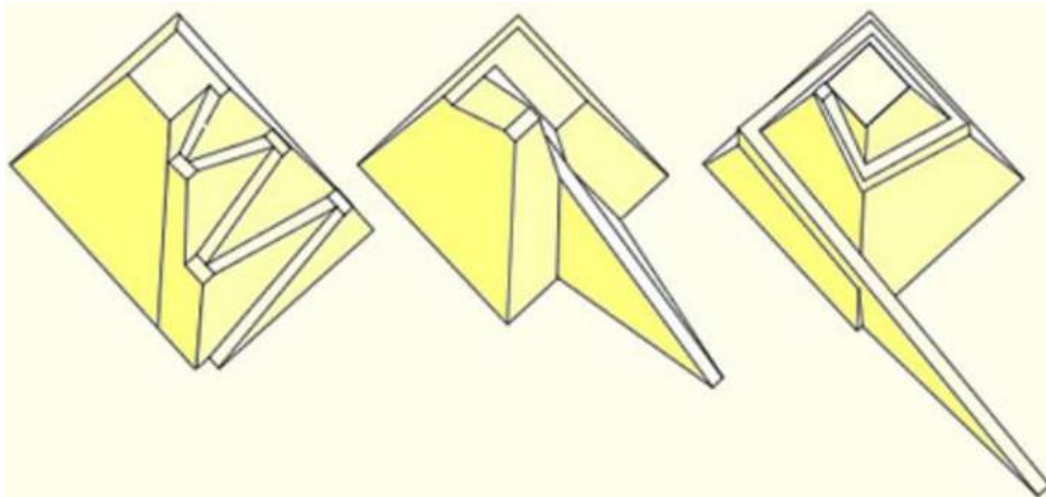
Le pyramidion restauré de la pyramide rouge est désormais à son pied.

Comment les Égyptiens construisaient-ils leurs pyramides ?

Les pyramides étaient probablement construites avec une rampe ou une glissière à l'extérieur du monument. La forme de cette glissière reste un mystère – cela pouvait être une rampe droite, une rampe en zigzag, une rampe interne ou une

rampe en spirale. Les rampes furent démolies par la suite et il ne reste que quelques rares témoignages de leur existence.

Il est encore difficile de savoir précisément comment le système fonctionnait. Les Égyptiens devaient transporter les blocs sur des traineaux. Les troncs de bois plantés à la verticale tout au long de la rampe devaient à la fois empêcher les blocs de dégringoler vers l'arrière, et servir de points d'appui pour hisser les traineaux avec un système de corde. Les chercheurs tentent de mettre au point des modèles pour essayer de reconstituer plus précisément la technique qui aurait pu être mise en œuvre.



Trois scénarios sont envisagés pour la construction de Kheops:

- une rampe droite (mais qui aurait dû mesurer au moins 1 km de long avec des pourcentages compris entre 5 et 10%) ;
- une rampe coudée qui aurait fait le tour de la pyramide (mais là encore les contraintes techniques liées aux pourcentages maximaux envisagés rendaient sa construction peu évidente) ;
- et enfin l'hypothèse d'une rampe intérieure.

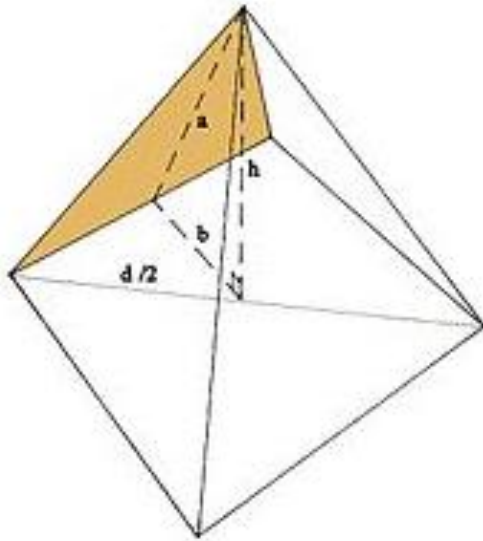
Pour Yannis Gourdon. *«... il n'est pas du tout exclu qu'il y en ait eu plusieurs, d'autant que des découvertes autour d'autres pyramides montrent qu'il y avait sûrement plusieurs rampes. Au moins une par côté pour monter les blocs.»*

Comment les Égyptiens calculaient-ils la pente d'une pyramide ?

Les problèmes R56, R57, R58 et R59 du papyrus Rhind détaillent la méthode de calcul de la pente d'une pyramide. Cette pente est désignée en ancien égyptien par le terme *seked*. C'est la demi-base divisée par la hauteur.

Voici l'énoncé d'un problème :

« Si la hauteur d'une pyramide vaut 8 coudées et la base douze coudées, quel en est la pente ? »



Sachant que 1 coudée royale = 7 palmes = 28 doigts, on exprime le seked en nombre de palmes horizontales pour une coudée verticale.

Pour trouver la réponse au problème du papyrus de Rhind, nous devons tracer un triangle rectangle, sachant que le segment b est égal à la moitié de la longueur de la base.

La hauteur = 8 coudées,

La demi-base = $12/2 = 6$ coudées

L'évaluation en palmes est $7 \times 6 = 42$ palmes

Et donc le seked = $42/8 = 5,25$ palmes = 5 palmes et 1 doigt.

PI (π) et le NOMBRE D'OR (Φ) ?

On mentionne souvent le nombre d'or et le nombre pi inscrits dans les proportions de la pyramide : les ont-ils utilisés consciemment ?

Dans le cas de Khéops, ils ont choisi une pente, pour les faces, de 14/11 (la hauteur étant de 280 coudées et la base de 2×220 coudées, la pente est égale à $280/220 = 14/11$).

Cette valeur fut pour la première fois appliquée à la pyramide de Meïdoun mais ne constitue pas une règle chez les constructeurs de l'Ancien Empire puisque certaines pyramides ont une pente de 6/5 (pyramide rouge), 4/3 (pyramide de Khéphren) ou encore 7/5 (pyramide rhomboïdale).

- Concernant le nombre d'or, la proportion de 14/11 entraîne un rapport apothème⁵/demi-base égal à :

⁵ L'apothème d'une pyramide régulière est la distance du sommet à une des arêtes de sa base.

$$\frac{\sqrt{14^2 + 11^2}}{11} \simeq 1,61859 \quad \text{proche de} \quad \varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \simeq 1,61803$$

- La valeur du nombre serait donnée par le rapport (demi-périmètre de la base)/hauteur.

On obtient ainsi une valeur approchée : $4 \times 11 / 14 = 22/7 = 3,14285 = \pi$.

Ce résultat découle donc de l'utilisation d'une pente de 14/11. S'il faut y voir une volonté délibérée (dans une telle construction, le hasard est fortement improbable !) de les inscrire dans la construction, le mérite en reviendrait donc à l'architecte qui utilisa pour la première fois cette pente pour la pyramide de Meïdoun, achevée sous le règne de Snéfrou.

Meïdoun servira de modèle pour la construction de Khéops reproduite par homothétie.⁶

L'encoche de Khéops.

La présence de cette encoche conforterait la théorie de Jean-Pierre Houdin selon laquelle la pyramide contiendrait une rampe interne ayant servi à la construction de l'édifice.



Encoche sur l'une des arêtes de la pyramide

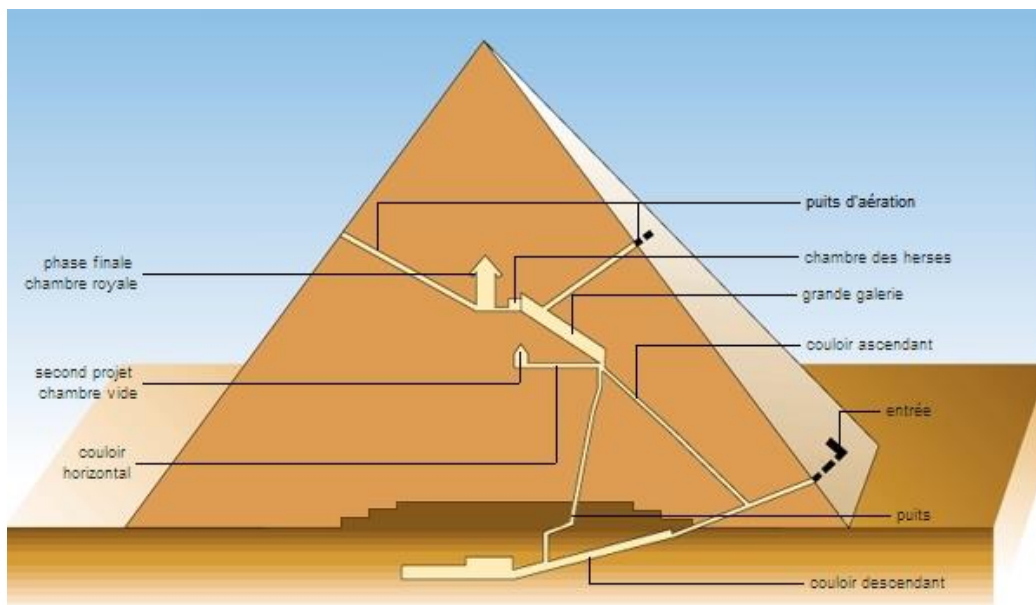
La grande pyramide est la plus ancienne des pyramides de Gizeh et la plus grande pyramide au monde, le seul monument survivant des Sept Merveilles du Monde Ancien, on comprend que, en matière de fouilles archéologiques, le ministre des Antiquités égyptien ait imposé aux meilleures équipes au monde dans le domaine des technologies d'utiliser des recherches non destructrices et "non invasives".

⁶ Une homothétie est une transformation géométrique par agrandissement ou réduction ; autrement dit, une reproduction avec changement d'échelle.

Car l'objectif numéro un reste de ne pas toucher aux pyramides. On ne creuse pas, on laisse les pierres tranquilles. On essaye juste de regarder à travers !



Pyramide de Khéops



Infrastructures de la pyramide de Khéops

Or donc, en 2013, une mission archéologique franco-égyptienne (Institut français d'archéologie orientale (IFAO), unité 8167 du CNRS) menée par Pierre Tallet a mis au jour, à 250 km de la pyramide, plusieurs fragments de papyrus signés par un certain **Merer**, l'un des contremaîtres de la pyramide, dépendant de Kankal, le demi-frère du pharaon".

Il s'agit d'un journal de bord qui a notamment révélé que le contremaître disposait d'une véritable équipe de quarante personnes qui dirigeaient 160 ouvriers qualifiés (et non des esclaves). Les archéologues ont compris, grâce à ces documents, comment Merer et son équipe ont acheminé les blocs depuis la carrière de Tourah

(au sud du Caire) jusqu'au site de construction des pyramides sur le plateau de Gizeh. Une méthode d'une folle ingéniosité puisque les ingénieurs ont utilisé à la fois des systèmes de halage sur les berges du Nil et le transport sur le fleuve lui-même lorsqu'il était en crue.



Transport des blocs

L'entrée de la pyramide, ci-dessous, située sur la face nord à une hauteur de 15,63 mètres¹⁵, est surplombée par un système de décharge avec voûtes et linteaux monolithiques. Sa fonction est de protéger le couloir descendant de la masse située au-dessus.



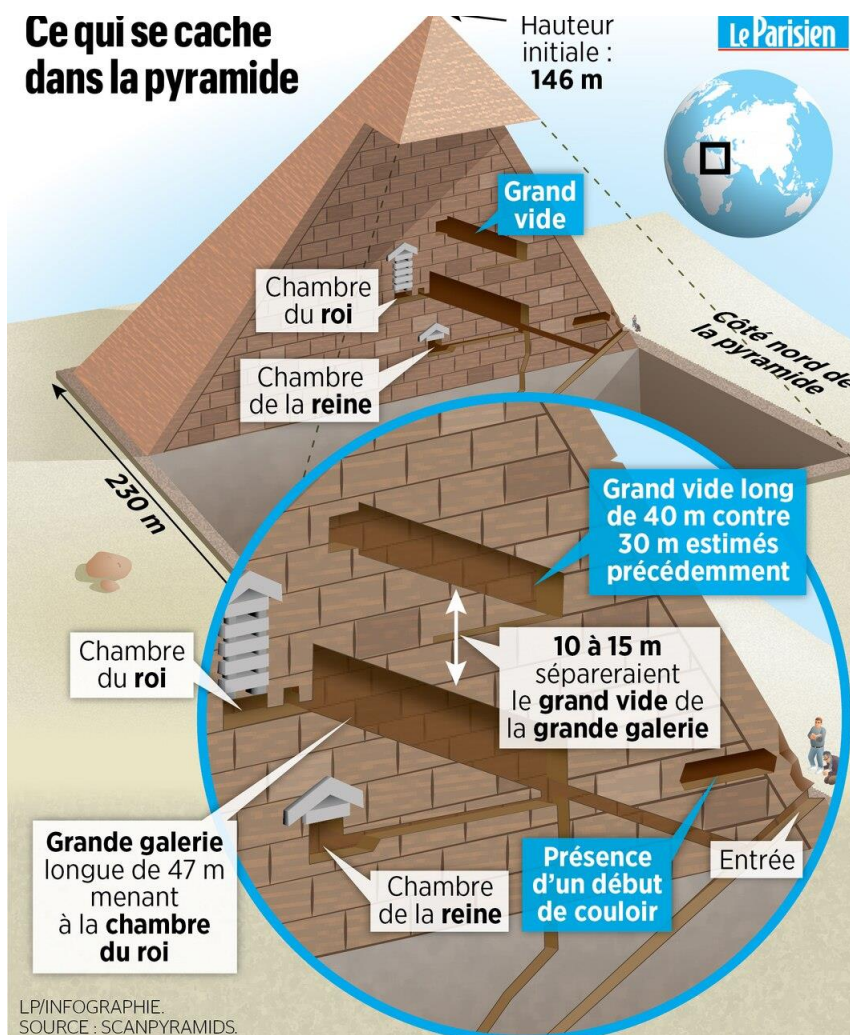
C'est dans une chambre de décharge au-dessus de la chambre du roi que l'égyptologue Vyse découvre en 1837 les seules inscriptions de la pyramide : le cartouche du roi Khéops, plusieurs fois tracé en rouge sur les blocs de pierre, si bien que le coffre est traditionnellement considéré comme le sarcophage ayant abrité la momie de Khéops. Mais, Gilles Dormion considère qu'il s'agit d'une chambre fausse destinée à tromper les voleurs.

Le couloir descendant, incliné avec une pente de 50 % et long de 105 mètres, aboutit à un couloir horizontal long de 8,90 mètres menant une chambre souterraine. Cette dernière, ainsi qu'une grande partie de la descenderie, a été creusée dans la roche naturelle et demeurée inachevée. En fait, elle constitue un premier projet abandonné, l'architecte ayant opté ensuite pour un aménagement dans la maçonnerie de la pyramide.

On accède à la « chambre de la reine » (qui, en réalité, n'a jamais été destinée à une reine mais fut nommée ainsi par les explorateurs arabes). Cette chambre de base carrée, placée dans l'axe est-ouest de la pyramide, possède une couverture en voûte avec pierres disposées en chevrons. Une niche, protégée par une voûte en encorbellement, fut aménagée dans le mur est de la chambre.

La grande galerie, l'antichambre et la « chambre du roi »

La grande galerie est l'élément architectural le plus impressionnant et le plus élaboré de l'Ancien Empire. D'une longueur de 47,80 mètres et d'une hauteur de 8,60 mètres par rapport à la verticale, la galerie est inclinée de $26^{\circ}10'16''30$. Elle est surmontée d'un plafond plat sans voûte, mais les assises sont des saillies en encorbellement sur quatre faces (technique héritée de la pyramide rouge ayant les saillies en encorbellement que sur deux faces et de la pyramide rhomboïdale à Dahshur). Une marche à l'extrémité supérieure de cette galerie donne sur une antichambre menant à la chambre du roi. Cette antichambre comportait un système de fermeture avec herse obstruant le passage mais aujourd'hui disparues.

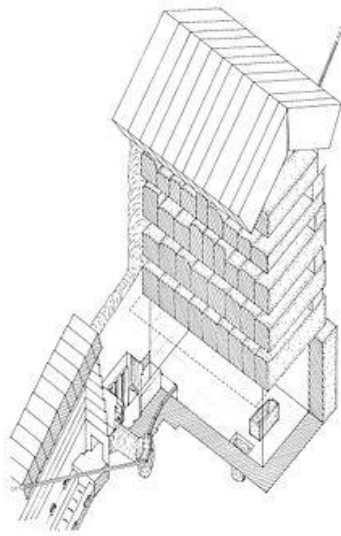


La « chambre du roi » est un magnifique ouvrage de granit de 10,47 mètres sur 5,23 mètres et d'une hauteur de 5,84.

La chambre est surmontée par une imposante couverture de blocs de granit répartis sur cinq niveaux, le dernier niveau étant surmonté d'une voûte de décharge avec pierres disposées en chevrons.

Ces grosses pierres, poutres et éléments de chevrons (en tout, sans doute une centaine de monolithes élevés à une hauteur de 70 m) pèsent environ quarante tonnes pour la plupart, et jusqu'à près de soixante-dix tonnes pour les éléments les plus volumineux. Ce sont les pierres les plus lourdes que l'on connaisse dans tout le monument et furent importés, sur le Nil, des carrières d'Assouan !!!

Le toit de cette couverture s'élève à plus de vingt mètres du sol de la chambre. Un coffre en granit, vide et sans couvercle, est disposé à l'ouest de la salle. Comme dans la « chambre de la reine », deux conduits de ventilation s'élèvent depuis la « chambre du roi » vers les faces nord et sud de la pyramide. La fonction de ces conduits d'aération fait l'objet de débats : ventilation ? Corridor symbolique pour conduire l'âme du roi (incarnation du pharaon en dieu Rê pour le puits nord, en dieu Horus pour le puits sud) ?



Coupe axonométrique des 5 blocs de granit surmontés de chevrons

Au fond de la chambre, à l'ouest, la cuve en granit (haute d'un mètre, longue de 2,30 m et large de 0,89 m) posée sur le sol présente des traces de scie et une brèche à un angle, probablement l'œuvre de pilliers de tombes qui ont tout emporté alors que le couvercle, jamais découvert, devait être encore en place (les rebords du sarcophage montrent un dispositif d'encastrement qui est la preuve de l'existence de ce couvercle). Il est possible que ce sarcophage ne soit qu'un cénotaphe, un tombeau érigé en mémoire du pharaon mais non destiné à recevoir son corps, ou

que Khéops soit mort dans une bataille sans que les prêtres aient pu récupérer son cadavre afin de lui rendre les derniers devoirs.



Chambre du roi et coffre en blocs de granit parfaitement ajustés

Détection surprise d'un « grand vide » dans la pyramide !

Pour satisfaire aux exigences « non destructives » et « non invasives », différentes méthodes ont été utilisées pour « voir » l'invisible ! :

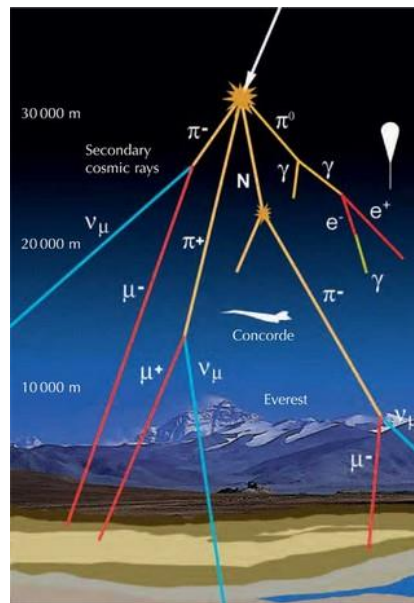
- *Des caméras thermiques.*

Cette technique consiste à placer des caméras thermiques infrarouges sur les faces des pyramides. Aujourd'hui, ce matériel a atteint de tels niveaux de précision que l'on va pouvoir, en mesurant les écarts de température, identifier des anomalies potentielles. Concrètement : repérer des cavités situées près des faces du monument. Les équipes de l'université Laval, au Québec, partenaires du projet,

ont déjà mené ce type d'expérimentation sur des églises en Italie, et sont arrivées à voir ce qui se cachait dans les murs.

- *La mesure des muons ou muographie.*

Qu'est-ce que le muon ? Lorsqu'un rayon cosmique entre en contact avec l'atmosphère, il émet des particules : les muons selon le schéma ci-dessous :



**Schéma de la gerbe de particules du rayon cosmique secondaire
(μ : muons)**

Le muon est, selon le modèle standard de la physique des particules, une particule élémentaire de charge électrique négative, instable. Le muon a pour spin 1/2 et a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mis à part sa masse, 207 fois plus grande, c'est pour cela qu'on l'appelle parfois « électron lourd »).

Sur Terre, les muons sont produits par la désintégration de pions chargés. Les pions sont créés dans la haute atmosphère par l'action des rayons cosmiques. Les muons ont une durée de vie faible (environ deux microsecondes).

Des muons positifs peuvent s'associer avec un électron pour former une particule appelée le muonium, ou μ^+e^- . À cause de la différence de masse entre le muon et l'électron, le muonium ressemble plus à un atome d'hydrogène que le positronium, association d'un positron avec un électron.

Les flux de muons sont très pénétrants et des millions de ces particules traversent le corps d'une personne, chaque jour.

La technique du muon est principalement utilisée en volcanologie mais a également été appliquée en archéologie et notamment pour l'étude de la Pyramide de Khéops.

Les muons qui tombent en permanence sur la terre sont capables de franchir des roches de grande épaisseur et permettent de radiographier les monuments en profondeur.

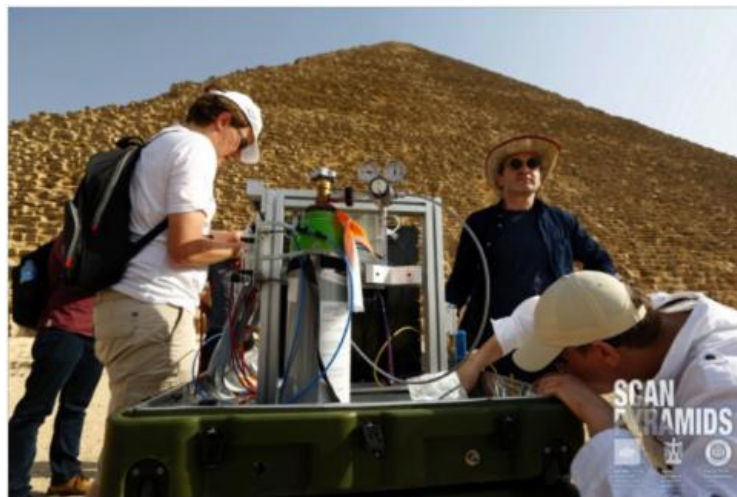
Le télescope à muons détecte en temps réel les particules cosmiques qui traversent un monument visualisant ainsi sa structure interne à la manière d'une radiographie.

Pour mesurer la présence de ces particules, il y a deux méthodes :

- la première ressemble à une sorte de papier photographique sensible à ces muons. Elle a d'abord été développée au Japon pour observer les chambres magmatiques des volcans.
- L'autre technique utilise un appareil électronique qui a été utilisé pour scanner l'intérieur des réacteurs de la centrale accidentée de Fukushima.

Ainsi, en 2016, « ScanPyramids » a découvert un nouveau vide au cœur de la pyramide de Kheops. Cette cavité fut détectée par des techniques d'imagerie muoniques conçues et mises en œuvre par trois équipes distinctes de l'Université de Nagoya (Japon), du KEK (Japon) et du CEA (France). Les résultats de l'étude, qui furent publiés dans la revue « Nature », ont révélé l'existence d'un **"big void"** (un grand vide), comme les chercheurs ont choisi de l'appeler, qui mesure de 30 à 40 mètres de long et se trouve à 40/50 mètres de la chambre de la Reine, au cœur même du monument (voir la figure de la page 20).

Le CEA a également construit trois télescopes à muons, constitués de détecteurs gazeux, et qui ont été déployés à l'extérieur (image ci-dessous) afin de sonder des zones complémentaires des équipes japonaises.



Un des télescopes à muons du CEA (France) durant son installation en juin 2016 devant la face Nord de Kheops.

Des drones ont également survolé les zones étudiées.

Enfin, des scanners lasers ont été placés à l'intérieur des pyramides pour réaliser une reconstruction en 3D des lieux et de l'ensemble du plateau du Gizeh et de

Dahchour. L'objectif étant d'avoir un double numérique des lieux, au millimètre près dans certaines zones, pour ensuite y glisser les données récoltées.

Une campagne de thermographie infrarouge sera réalisée dans la tombe de Toutankhamon. L'objectif étant de vérifier la thèse de l'archéologue britannique Nicholas Reeves, qui affirme que le site pourrait dissimuler deux portes secrètes, plâtrées, puis recouvertes de fresques. L'une d'elles pourrait dissimuler la chambre funéraire de Néfertiti, cette reine à la beauté légendaire, qui exerça un rôle politique et religieux fondamental au XIV^e siècle avant Jésus-Christ.