

Avril 2007

SCIENCES et Avenir

SCIENCES ET AVENIR

PRÉSIDENTIELLE
**Vote
électronique
attention
à la fraude**

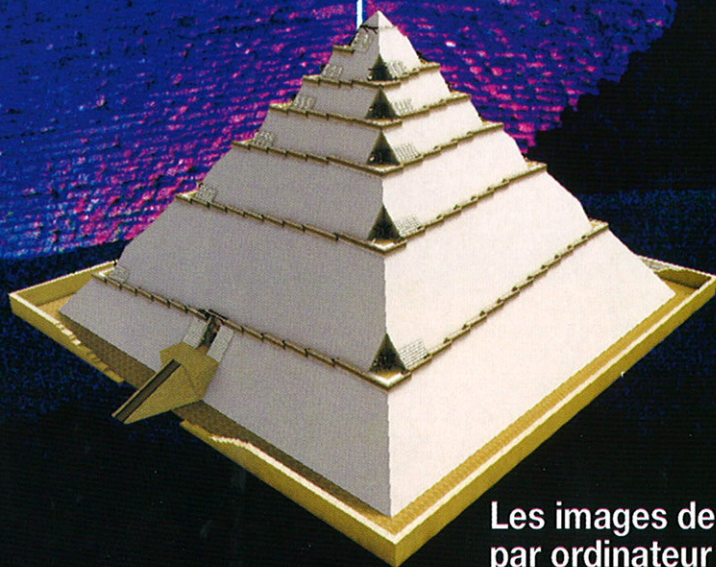
p.8



INFARCTUS, DIABÈTE, ALZHEIMER...
L'espoir des cellules souches p.60

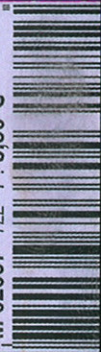
RÉVÉLATIONS SUR KHEOPS

Un architecte français aurait résolu
le mystère de sa construction



Les images de la simulation
par ordinateur page 44

M 02667 - 722 - F : 3,80 €



BEIGUE 4,40 € / CANADA 5,25 \$ / ITALIE 4 € / LUXEMBOURG 4,40 € / SUISSE 7,80 FS / GRÈCE 4 € / ESPAGNE 4 € / PORTUGAL (CONT) 4 € / MAROC 30 DH / ANTIILLES 4,50 € / ALLEMAGNE 6,50 € / TUNISIE 4,0 DTU / AUTRICHE 4,40 €
© J.Hermann/Bilderberg/StudioX



DOMINIQUE LEGLU

Directrice de la rédaction

“Total symbole”

Les ordinateurs ont ceci de pratique qu'ils ne font pas de trou dans les murs. Quand on leur demande de s'attaquer à une légende haute de 146 mètres et pesant plus de 5 millions de tonnes, c'est toujours cela d'évité. En revanche, il ne faut pas lésiner à leur fourrer mesures et chiffres dans tous les recoins de mémoire, en vue d'un concassage dans les règles de l'art informatique. Une fois que leur a été fourni le sens de l'histoire, ils peuvent en effet, après broyage et savante trituration de bits, faire naître de fantastiques images en 3D. Et, devant nos yeux ébahis, tisser la trame pixelisée d'une chronique disparue. Celle de l'épopée de l'élévation de la Grande Pyramide, voilà 4500 ans. Elle a peut-être duré presque un quart de siècle, mais ces bâtisseurs d'empire que furent les Egyptiens ne nous ont pas laissé le moindre hiéroglyphe à son sujet. Au fil des siècles, la construction du mausolée royal s'est donc muée en un mystère toujours plus impénétrable quand il n'a pas viré à l'ésotérisme.

C'est cette aventure merveilleuse et numérique d'une construction enfin révélée – un vrai scoop de surcroît – que conte ce mois-ci *Sciences et Avenir* (lire p. 44). Une rencontre entre antiquité et modernité, sous le signe de l'ingéniosité. Rien ne manque à ce polar Kheops, total symbole. D'abord, il y a nos deux découvreurs, l'ingénieur et l'architecte, couple père-fils complices. L'un fait germer l'idée, l'autre la développe (lire p. 46). Il leur faut de la patience, beaucoup de patience. Leur hypothèse est si séduisante que le fils en

abandonne son cabinet, comme il l'a confié à notre spécialiste. La passion l'emporte, mais jamais ne déserte la rigueur scientifique et technique. Il y a ce mécène (fondation EDF) qui, jadis, accumula des mesures précieuses de microgravimétrie – modernes grimoires qu'il faut à nouveau décrypter. Il y a enfin cet autre mécène au rôle décisif, entreprise mondialement connue (Dassault Systèmes*). Presque trop beau, la passion Kheops, tel le mistigri, s'empare de ses ingénieurs. Ils lancent alors leurs ordinateurs à l'assaut de la pyramide et en testent les secrets. Un pouvoir de simulation diablement convaincant (lire p. 53). Et beau comme l'antique!

*www.3ds.com/fr/

PS : Nous ne pouvions pas ne pas rendre hommage ici à deux grands esprits récemment disparus, et qui étaient proches de notre magazine. Le psychiatre Edouard Zarifian, célèbre depuis son rapport en 1996 sur la surconsommation de psychotropes en France, s'intéressait aussi bien à la neurologie qu'à la psychanalyse. Il nous avait accordé un entretien (*S. et A.* n° 701, juillet 2005), où il ne manquait pas d'exhorter à la prudence en rappelant que « la science s'arrête aux portes de l'intime ». Quant au philosophe Jean Baudrillard, dans le registre du photographe qu'il était aussi, il nous mettait en garde, lui, contre l'illusion d'un monde totalement transparent. Et exhortait « chacun à retrouver [sa] part d'ombre ». Tous deux détestaient le scientisme.



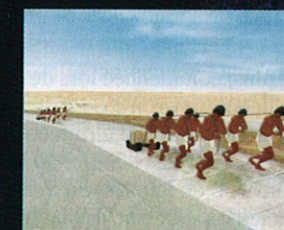
Révélation sur Kheops

Le mystère de la construction de la Grande Pyramide serait résolu grâce à une idée nouvelle : une ingénieuse rampe intérieure.

Dossier réalisé par Aline Kiner avec Bernadette Arnaud et Olivier Hertel



L'architecte Jean-Pierre Houdin explique son hypothèse p. 46



Un chantier validé par la simulation numérique p. 50



Mille et une légendes autour des pyramides p. 56

Les secrets d'un chantier

Une hypothèse originale sur la construction des pyramides, proposée par un ingénieur et un architecte français, vient d'être validée par les outils de la simulation numérique.

Ils l'ont baptisée l'œuf de Colomb. Une sorte de clin d'œil, mais finalement assez juste pour qualifier leur nouvelle hypothèse sur la construction des pyramides d'Égypte. Lors d'un repas, Christophe Colomb lance un défi : qui saurait faire tenir un œuf debout ? Personne n'y parvient. Il écrase alors l'œuf et lui donne une base. « Il suffit parfois de changer de vision pour trouver la solution », disent Henri et Jean-Pierre Houdin. Aujourd'hui, leur solution intéresse les plus éminents égyptologues. Parmi lesquels Zahi Hawass, le tout-puissant patron des Antiquités égyptiennes (lire *Sciences et Avenir* n° 719, janvier 2007), lui-même spécialiste des pyramides, pourtant très chatouilleux quand on approche de trop près ces symboles nationaux : « Oui, confie-t-il, c'est une bonne théorie. »

L'histoire débute en 1999. Henri Houdin, ingénieur des Arts et Métiers à la retraite, regarde un documentaire sur la construction des pyramides. Il a alors une sorte d'intuition : et si au lieu de grimper sur ces gigantesques tas de pierres pour les bâtir, on les avait élevés du dedans ? Il se met à dessiner une rampe intérieure « qui grimpe doucement en spirale, comme un escargot, sous la peau de Kheops ». « Une idée d'ingénieur », encore approximative, dit Jean-Pierre, son fils architecte. Mais le concept est là. Et l'aventure peut commencer.

Car après cent ans de recherches (lire p. 58), le mystère des pyramides, et surtout de la plus grande d'entre elles, celle de Kheops, n'est toujours pas résolu. Kheops, c'est plus de 146 mètres de haut, une superficie de cinq hectares, un volume de près de 2,6 millions de m³. « Il faut attendre la fin du Moyen Âge pour que les flèches de quelques cathédrales la dépassent », s'émerveille l'égyptologue Richard Lebeou (1). Six millions de blocs ont été nécessaires à son édification, soit plus de 5 millions de tonnes de matériaux. Parmi lesquels des dalles colossales de granit, pesant jusqu'à 63 tonnes, qui ont été montées à plus de 60 mètres de hauteur, au-dessus de la chambre dite du Roi. La pyramide, lisse à l'origine, était de

plus entièrement couverte d'un revêtement de calcaire, venu des carrières de Toura, sur l'autre rive du Nil : il n'en reste plus aujourd'hui que quelques blocs, le reste ayant été prélevé par des carriers au Moyen Âge, mais ils révèlent des joints et un surfaçage d'une finesse exceptionnelle. Or cet incroyable chantier a été réalisé il y a 4500 ans, à une époque où l'on ne connaissait pas encore la roue pour le transport, où l'on disposait seulement d'outils de pierre et de cuivre pur, un matériau qui s'use rapi-



« Ça a commencé comme un jeu. Henri m'a demandé : « Dessine-moi une rampe intérieure » »

Jean-Pierre Houdin, architecte

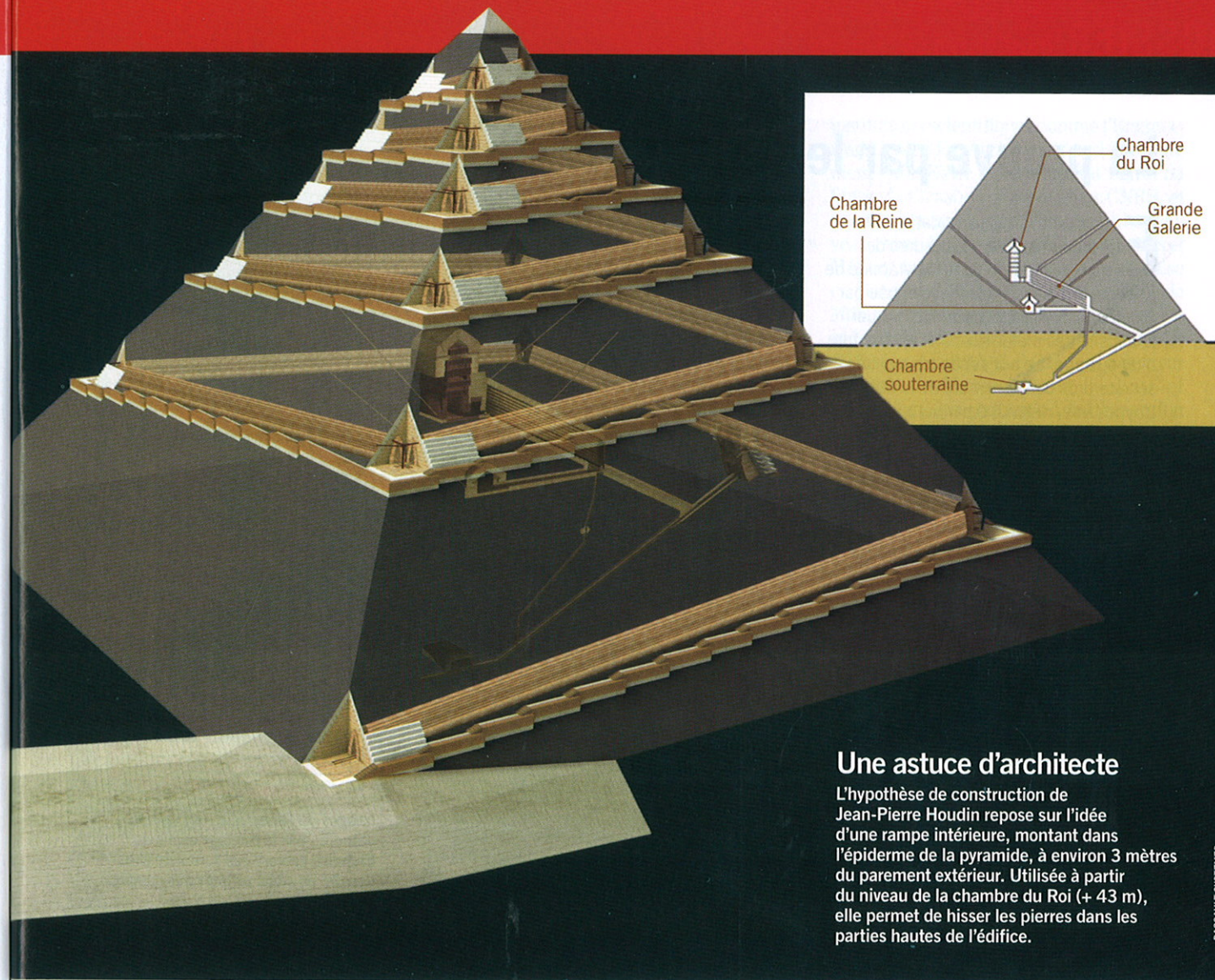
dement. De plus, commencée lors de l'avènement de Kheops (environ 2538-2516 avant J.-C.), la pyramide doit être terminée pour sa mort. Au-dessus de la chambre du Roi, à 58 mètres environ de la base, on a découvert un précieux indice sur l'avancée des travaux : un graffiti daté de l'an 17 du règne de Kheops. « Compte tenu [...] du volume déjà construit, calcule l'égyptologue Jean-Pierre Adam, on peut en déduire que le chantier poursuivi au même rythme devait se prolonger encore durant huit ans. » (2). Soit environ vingt-cinq ans pour élever

le plus haut monument de l'Antiquité. Un délai relativement bref. Comment ont-ils fait ? Les Égyptiens sont d'un mutisme remarquable sur le sujet. Alors que nous disposons d'une documentation riche sur la construction au Moyen Empire (1991-1650 avant J.-C.) et au Nouvel Empire (1539-1069 avant J.-C.), il n'y a aucun écrit, quasi aucun dessin pour l'Ancien Empire (2635-1140 avant J.-C.), temps des pyramides. Les textes d'Hérodote, au V^e siècle avant J.-C., restent la source la plus ancienne. Mais lorsque l'historien grec visite l'Égypte, les pyramides ont déjà plus de deux millénaires !

C'est donc à partir de ce témoignage incertain, de celui plus imprécis encore de Diodore de Sicile, historien grec du I^{er} siècle avant J.-C., et de rares traces archéologiques, que se sont développées les nombreuses hypothèses. « Le problème, c'est qu'aucune ne fonctionne vraiment », concède Rainer Stadelmann, de l'Institut d'archéologie allemand du Caire, qui a travaillé plus de vingt ans sur les pyramides du roi Snefrou (2561-2538 avant J.-C.) à Dachour, ainsi que dans Kheops. L'hypothèse la plus connue (lire p. 56), celle d'une rampe frontale, perpendiculaire au monument, qui aurait permis de grimper les blocs sur des rouleaux de bois, ne tient pas. Car plus la pyramide s'élève, plus la rampe doit monter avec elle. Résultat : une pente trop raide, ou bien une chaussée qu'il faut allonger au fur et à mesure. « Pour arriver à une déclivité raisonnable, la rampe aurait dû mesurer 1,6 km, précise Jean-Pierre Houdin. »

Les autres hypothèses, rampe hélicoïdale, en zigzag ou machines élévatoires, ont elles aussi leurs limites. Et toutes achoppent sur la même faiblesse : elles n'ont jamais été vérifiées dans le détail du point de vue du génie civil, calcul du cubage de matériaux, de la tenue à la charge des voies, place nécessaire pour la main-d'œuvre, etc.

C'est là que l'hypothèse développée par l'architecte français va faire la différence. Dès le départ, Jean-Pierre Houdin délaisse la planche à dessin pour les outils numériques.



Une astuce d'architecte

L'hypothèse de construction de Jean-Pierre Houdin repose sur l'idée d'une rampe intérieure, montant dans l'épiderme de la pyramide, à environ 3 mètres du parement extérieur. Utilisée à partir du niveau de la chambre du Roi (+ 43 m), elle permet de hisser les pierres dans les parties hautes de l'édifice.

« Ça a commencé comme un jeu, se souvient-il. Henri m'a demandé : "Dessine-moi une rampe intérieure". Alors je l'ai fait, mais en 3D. Parce que celle-ci permet de faire apparaître ce que vous ne pouvez pas voir sur un dessin à plat : des rapports entre certaines dimensions... » Il rentre d'abord dans sa machine des plans trouvés à droite et à gauche, dans des livres. Puis, en janvier 2003, il a accès à la bible : les relevés de la Grande Pyramide réalisés par l'architecte français Gilles Dormion, les plus complets et précis jamais publiés (lire *S. et A.* n° 691, septembre 2004). « La pelote de laine a été d'autant plus facile à dévider que j'avais les cotes exactes », conclut-il.

Jean-Pierre Houdin ne travaille pas en archéologue, mais en concepteur. Connaissant les dimensions, les matériaux, les ouvrages intérieurs, la durée de construction, les moyens humains disponibles – 4000 à 5000 personnes au plus peuvent travailler en même temps sur le site –, il réfléchit à une organisation optimale du chantier. Contrairement à d'autres, il ne recourt qu'à des outils et techniques dont on est sûr

qu'ils étaient maîtrisés à l'époque. Il envisage le projet de manière globale, depuis le choix du site et l'arrivage des blocs jusqu'à la pose du pyramidion, la pierre qui coiffait à l'origine le monument.

Résultat, une série de *process* ingénieux qui s'enchaînent autour de quatre idées-forces (lire p. 50) : utilisation de la déclivité naturelle du terrain, combinaison d'une rampe extérieure en pente douce qui permet de monter la pyramide à 43 m de haut (soit plus de 70 % du volume de pierres) et d'une rampe intérieure pour achever la partie haute et, enfin, aménagement d'un ingénieux système de contrepoids dans la Grande Galerie, ce large corridor en pente qui mène jusqu'à la chambre du Roi, afin d'élever les blocs de granit d'Assouan qui la coiffent.

« Un chantier d'une incroyable modernité », s'étonne-t-il encore, après huit ans passés au chevet de Kheops. Huit années au cours desquelles il a abandonné son cabinet d'architecte, écrit deux livres (3), donné des conférences à l'Institut national des sciences appliquées (Insa) de Strasbourg, à l'École centrale de Nantes, aux Arts ●●●



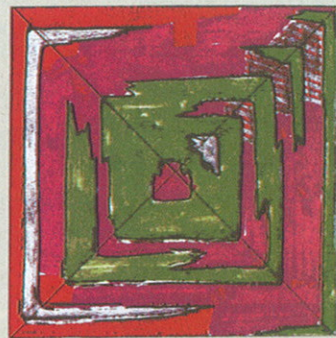
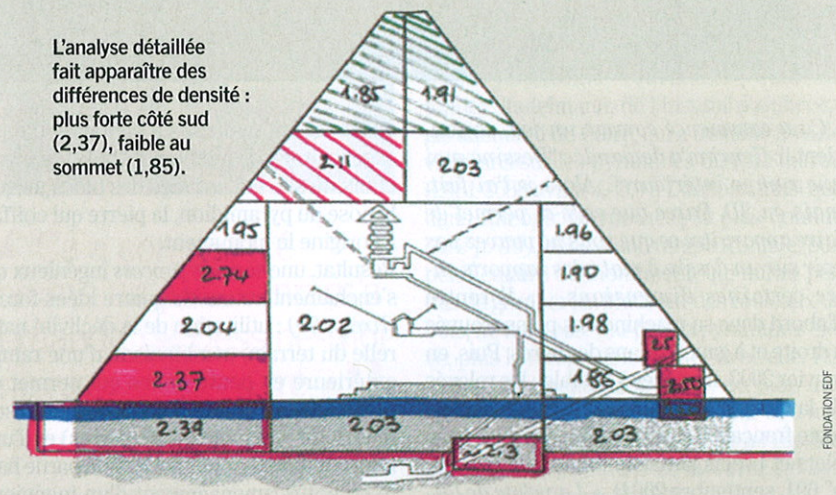
Cette figurine d'ivoire est la seule statuette connue de Kheops, mystérieux souverain de la IV^e dynastie (2538-2516 avant J.-C.).

La preuve par les cavités?

En 1986 et 1987, la fondation Elf finance une série de mesures de microgravimétrie dans la pyramide de Kheops. Cette méthode, développée par Electricité de France, permet d'évaluer la densité des matériaux dans la structure d'un ouvrage. Le but est de trouver une cache secrète près de la chambre de la Reine. L'hypothèse, défendue par deux architectes, Gilles Dormion et Jean-Patrice Goidin, connaîtra par la suite d'autres développements (lire S. et A. septembre 2004), mais, à l'époque, la campagne, surmédiatisée, est un échec. Commence alors la deuxième phase de l'étude, plus discrète, qui va apporter une série de révélations inattendues. « La Compagnie de prospection géophysique de France avait disposé plus de 750 stations de mesure, le long des quatre arêtes, des quatre bases, dans les galeries et dans les chambres, raconte Huy Duong Bui. Alors nous nous sommes dit, plutôt que de chercher une cavité, pourquoi ne pas nous intéresser à la structure de la pyramide? » Cet ingénieur EDF aujourd'hui détaché à l'Ecole polytechnique faisait partie de l'équipe chargée du long dépouillement des calculs effectués par les ordinateurs à partir des mesures de terrain. « Première découverte, résume-t-il, la pyramide n'a pas la densité qu'elle devrait avoir. Avec ce que nous savons de sa structure et de la nature de ses matériaux, si toutes ses pierres étaient jointives, la densité globale serait de 2,7; en considérant qu'elles ne le sont pas, la densité devrait être de 2,5. Or nous sommes arrivés à 2,05. Il fallait donc qu'il y ait autre chose, des "creux" méconnus quelque part. » Lors du congrès de géologie d'Athènes, en septembre 1988, les experts publient leurs résultats. Et que disent-ils? Jusqu'à environ 100 mètres de hauteur « des zones lourdes alternent avec des zones légères sans qu'il ressorte de symétrie simple autre qu'une certaine allure en spirale ». Cette « spirale » se superpose assez idéalement avec le plan

de la rampe intérieure imaginée par Jean-Pierre Houdin. « Une ébauche de preuve », selon les mots de l'architecte auteur de la nouvelle hypothèse de construction de Kheops. Autre résultat troublant : les 50 m supérieurs de la pyramide sont peu denses, 1,85 g/cm³ en moyenne. Serait-ce le vide de la rampe intérieure, relativement plus important dans la partie étroite de la pyramide, qui expliquerait cette différence? Par ailleurs, la densité de la pyramide jusqu'au niveau de la chambre du Roi est beaucoup plus forte sur la face sud que sur la nord (voir schéma ci-dessous). Or c'est du côté sud, selon l'hypothèse de Jean-Pierre Houdin, que s'appuyait la rampe extérieure. Les Egyptiens ont peut-être voulu consolider cette zone pour encaisser la surcharge due à la rampe. Enfin, la densité des arêtes est également plus importante, à intervalles réguliers, comme si elles avaient été renforcées pour compenser les faiblesses créées par les paliers en encoches de la rampe intérieure. Huy Duong Bui se dit très intéressé par la théorie de Jean-Pierre Houdin, mais « nous n'avons pas assez de mesures pour tirer des conclusions, dit-il. Il faudrait refaire une campagne sur toutes les faces. ». A. K.

L'analyse détaillée fait apparaître des différences de densité : plus forte côté sud (2,37), faible au sommet (1,85).



Images de l'anomalie « en spirale » détectée par la microgravimétrie. En haut, en vert, les zones de sous-densité pouvant refléter des cavités.

●●● et Métiers... « Pour m'exposer, avoue-t-il, éprouver mon hypothèse auprès de mes pairs. » Le Conseil national des ingénieurs et scientifiques de France (CNISF) lui apporte son soutien. Surtout, dès 2000, Jean-Pierre Houdin a eu accès à un précieux document, qui l'a renforcé dans ses convictions : l'analyse de mesures de microgravimétrie réalisées dans Kheops, en 1986, sous l'égide de la fondation Elf. Ces mesures avaient pour but de trouver une chambre

secrète (lire S. et A. n° 703, septembre 2004). La mission fut un échec, mais par la suite, le dépouillement des données a mis en évidence dans le monument des anomalies de densité en forme de spirale : la fameuse rampe intérieure? (Lire ci-dessus.) Puis, en 2005, c'est la rencontre, déterminante, avec les équipes de Dassault Systèmes. A partir de ce moment, l'hypothèse va devoir affronter une nouvelle épreuve : celle de la validation numérique.

La vocation de Dassault Systèmes est de proposer des outils de création et de simulation 3D pour l'industrie : de la bouteille d'eau ergonomique à l'automobile, dès qu'un produit est imaginé, il est testé virtuellement. C'est ainsi que le futur Boeing 787 est le premier avion de ligne entièrement conçu et simulé en numérique. « Quand nous avons rencontré Jean-Pierre Houdin, raconte Mehdi Tayoubi, directeur de projet Kheops, nous venions de

lancer un programme de mécénat, Passion for Innovation. Ce qui nous a séduit chez lui, c'est qu'il réfléchissait en 3D. Et qu'il considérait la pyramide comme un chantier industriel. Nous nous sommes dit : vérifions les différents points de la théorie, et voyons, comme pour un avion ou un bateau, si ça fonctionne dans le monde virtuel, si tous les processus s'enchaînent logiquement. »

Kheops est d'abord modélisée géométriquement, avec sa distribution interne, ses couloirs et ses chambres : « Une phase de prospection qui permet de voir la pyramide autrement, de la manipuler à la vitesse de la pensée », explique Richard Breitner, créateur du programme Passion for innovation, et chef de projet Kheops. Puis, avec l'aide de géologues, les données physiques des matériaux sont entrées dans l'ordinateur : le calcaire, avec sa densité et sa dureté, le granit de la chambre du Roi avec son élasticité quasi nulle. Dernière phase, la modélisation fonctionnelle : roulements, frottements des mécanismes mis en œuvre sur le chantier, tel le système de contrepoids de la Grande Galerie. Ensuite, l'équipe passe à la phase de simulation. Une simulation dynamique qui intègre le facteur temps : « Nous nous sommes fixé comme échéance vingt-trois ans pour l'ensemble du chantier », précise Richard Breitner. Et bien sûr le facteur humain : « Sachant que nous connaissons la force développée par un homme, combien en faut-il pour exécuter telle ou telle manœuvre? », poursuit-il.

Les machines « moulinent » pendant un an et demi. Dassault Systèmes ne se contente pas de prêter ses logiciels. Une quinzaine de personnes est mise à contribution sur le projet. Etape après étape, l'hypothèse est affinée, validée. Tout fonctionne : rampe extérieure, intérieure, contrepoids de la Grande Galerie. Les informaticiens vont plus loin. Ils soumettent la chambre du Roi à un « crash test » (lire p. 53) : les poutres de granit qui la couvrent sont en effet fissurées, ce qui a alimenté bien des spéculations. Quand l'accident s'est-il produit? A-t-il obligé les constructeurs à modifier leurs plans? A déplacer le corps de Kheops? L'équipe de Dassault Systèmes se prend au jeu, tombée à son tour dans le piège de Kheops. Après les ingénieurs, ce sont aujourd'hui les égyptologues qui apportent leur soutien à Jean-Pierre Houdin. Parmi ses conseillers, l'archéologue Dieter Arnold, spécialiste de la construction à la période pharaonique,

conservateur au Metropolitan Museum of Art de New York, l'Américain Bob Brier, alias « monsieur Momies ». Et Rainer Stadelmann, qui s'avoue séduit : « C'est un merveilleux dessinateur et je trouve son idée très intéressante. Spécialement tout le début : l'utilisation de la pente naturelle du terrain, la rampe intérieure... » L'égyptologue est plus réticent sur d'autres aspects de l'hypothèse, notamment l'utilisation de la Grande Galerie pour un système de contrepoids. « Mais, dit-il, l'une des grandes qualités de Jean-Pierre Houdin, c'est de prendre les bâtisseurs de l'époque au sérieux : il ne les considère pas comme des primitifs, mais comme de grands

institutions scientifiques comme l'Engineering Center for Archeology and Environment (ECAE) de l'université du Caire, ou l'Insa de Strasbourg associé au CNRS, et une cinquantaine de consultants de haut niveau : Marc Buonomo, ingénieur des Arts et Métiers, inventeur de la technique de mise en place du tablier métallique du viaduc de Millau, Denis Denoël, ingénieur du Cnam et spécialiste des bancs d'essai pour moteurs de fusées, Mourad M. Bakhom, ingénieur diplômé du Massachusetts Institute of Technology, qui participe à la conception du futur Musée égyptien du Caire, Jean Billard, du Collège de France, spécialiste des techniques non destructives... Plusieurs grandes entreprises spécialisées dans la prospection non invasive font aussi partie de son équipe : la Safege, qui a réalisé en 1986 les mesures de microgravimétrie dans Kheops, TCC qui vient de réaliser la carte thermique de la ville de Reims par infrarouge, ou encore Thales, avec qui Jean-Pierre Houdin a récemment mené des expériences radar dans les châteaux picards de Pierrefonds et Coucy.

Toutes ces techniques pourraient être mises en œuvre dans Kheops si l'intérêt de Zahi Hawass pour l'hypothèse se précisait. En attendant, Jean-Pierre Houdin et Dassault Systèmes ont réalisé une reconstitution du chantier en 3D temps réel : une balade vertigineuse au-dessus du site, des rives du Nil au village

des ouvriers, de la carrière au cœur du monument, aux côtés des tailleurs de pierre et des haleurs. Le film est projeté ce 30 mars à la Géode qui devient, à l'occasion, la plus grande salle de réalité virtuelle 3D en temps réel du monde (lire p. 59). Et mis en ligne, le même jour, sur Internet (4). « Nous ne pouvons pas affirmer que les Egyptiens ont construit Kheops dans le détail tel que nous le montrons, reconnaît Richard Breitner. Mais donnez-nous des pierres, un plateau comme celui de Gizeh, des hommes, et en vingt ans, avec la théorie de Jean-Pierre Houdin, nous vous bâtissons la pyramide! » Aline Kiner

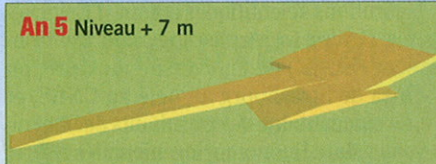


« Ce qui nous a séduit chez Jean-Pierre Houdin, c'est qu'il réfléchissait en trois dimensions »

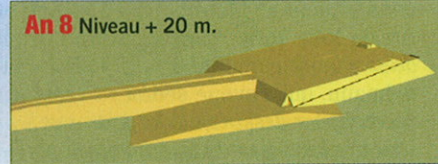
Mehdi Tayoubi (Dassault Systèmes), à gauche, avec Jean-Pierre Houdin et Richard Breitner

maîtres de la construction, des ingénieurs. » Et de conclure : « Ce qu'il faut maintenant, c'est vérifier sa théorie sur place. » Cela avec des méthodes non invasives. Zahi Hawass l'a dit et répété : pas question de faire le moindre trou dans la pyramide. Le sujet est sensible. Pour l'instant, Jean-Pierre Houdin n'a pas déposé de demande officielle. En tant qu'« amateur », selon les nouvelles règles des Antiquités égyptiennes, il serait débouté. Mais, outre Dieter Arnold et Rainer Stadelmann, il est soutenu par Hany Helal, ministre égyptien de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, de grandes

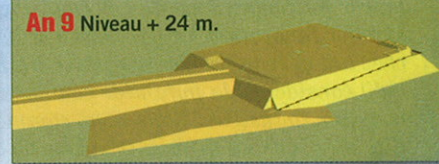
(1) Pyramides, temples, tombeaux de l'Égypte ancienne, éditions Autrement.
(2) Les Pyramides d'Égypte, avec Christiane Ziegler, Hachette littératures.
(3) La pyramide de Kheops, Jean-Pierre et Henri Houdin, éditions du Linteau. Kheops, les secrets de la construction de la Grande Pyramide, Jean-Pierre Houdin, éditions du Linteau / Farid Atiya Press.
(4) www.3ds.com et www.construire-la-grande-pyramide.com



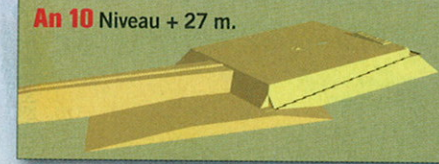
An 5 Niveau + 7 m
Premier nivellement de la pyramide. Début de la construction de la rampe intérieure dans l'angle sud-est.



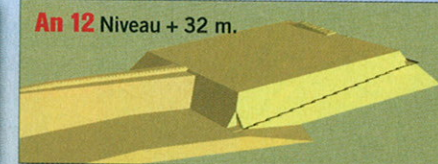
An 8 Niveau + 20 m.
Début de la construction de la chambre de la Reine. La rampe intérieure atteint l'angle nord-est : premier palier.



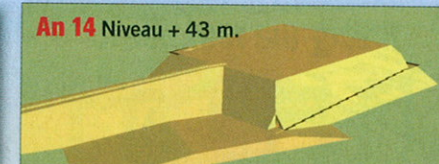
An 9 Niveau + 24 m.
Construction du toit de la chambre de la Reine.



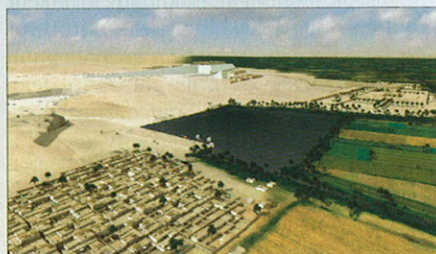
An 10 Niveau + 27 m.
Début de la construction de la Grande Galerie. La rampe intérieure continue sa progression, croisant l'entrée de la pyramide la onzième année.



An 12 Niveau + 32 m.
Deuxième nivellement de la pyramide. La rampe intérieure atteint l'extrémité nord-ouest de la pyramide : deuxième palier.



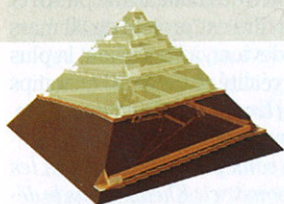
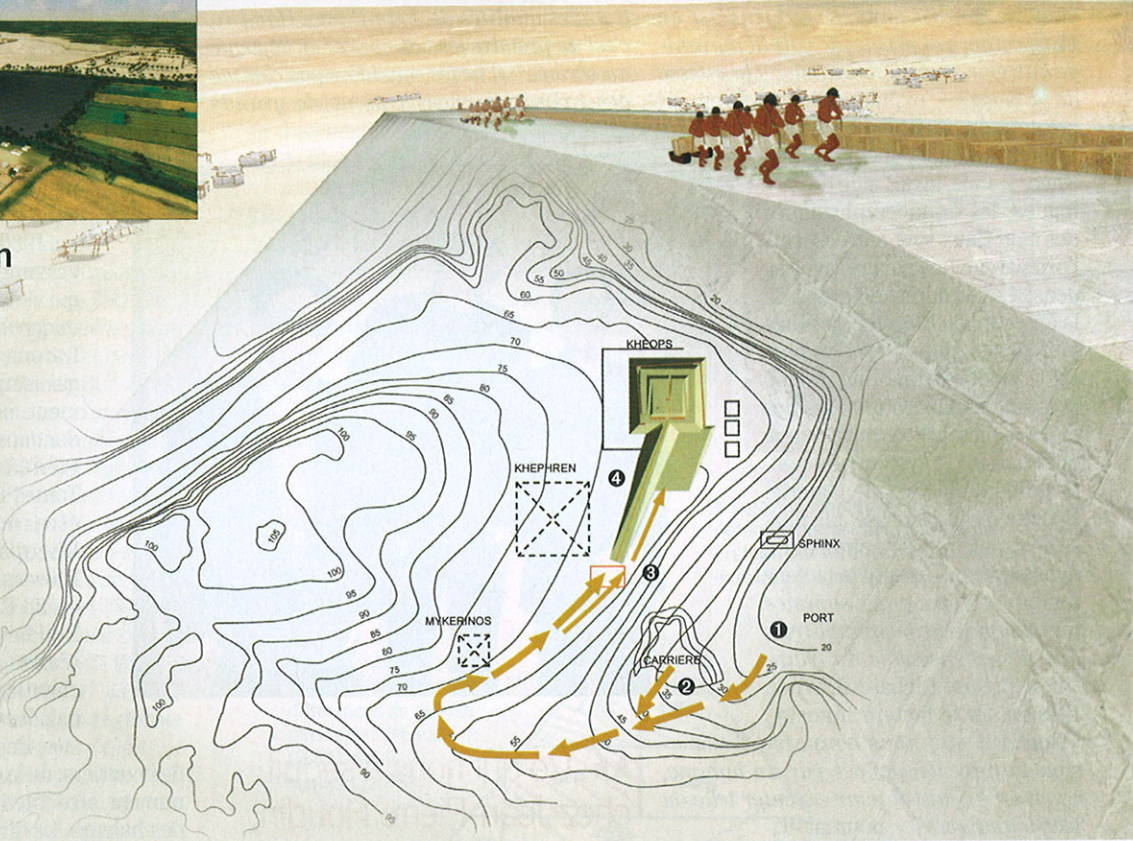
An 14 Niveau + 43 m.
Troisième nivellement. La Grande Galerie est terminée, la pyramide a atteint le niveau à partir duquel sera construite la chambre du Roi.



Epouser le terrain

La voie d'accès à la pyramide suit la déclivité du terrain. Partie du port ① où arrivent les pierres de Toura et le granit d'Assouan, elle emprunte un oued qui passe devant la carrière de calcaire local ②, puis monte en pente douce jusqu'à la cote 67 ③. Là, démarre la rampe extérieure ④ construite dans la continuité de l'oued. Longue de 425 m, elle s'appuie sur la face sud de la pyramide. Sa pente est d'environ 7 %.

ALBERT RONSON



De l'an 1 à l'an 14 : la construction par la rampe extérieure

4000 hommes, une vingtaine d'années pour élever le plus haut monument de toute l'Antiquité : afin de réussir ce pari, les Egyptiens ont minutieusement programmé et remarquablement organisé leur chantier. Postulat de départ de l'architecte Jean-Pierre Houdin : la combinaison de deux rampes. La première, extérieure, va permettre de construire la base de la pyramide, jusqu'à 43 mètres de haut, niveau de la chambre du Roi, soit plus de 70 % du volume de l'édifice. Cette première phase dure environ jusqu'à l'an 14 (voir le déroulé ci-dessus). Ensuite, c'est une rampe intérieure qui prendra le relais pour les parties hautes. Mais elle est

intégrée dans le corps du bâtiment dès la sixième assise (voir An 5), montant avec lui sans jamais gêner le chantier. Première étape, l'implantation de la pyramide et de sa rampe extérieure. Les Egyptiens se servent de la déclivité du terrain pour économiser efforts et matériaux. Une partie des pierres arrive par le port, l'autre (environ les 5/6) est extraite d'une carrière qui se trouve à proximité, sur le rebord d'un oued. Les constructeurs utilisent la dépression de cet oued pour tracer la voie d'accès des matériaux au chantier. Partie du port, elle passe à proximité de la carrière puis, suivant les courbes de niveau, monte douce-

ment jusqu'au plateau où doit être bâtie la pyramide (voir « Epouser le terrain »), facilitant la tâche des ouvriers qui tirent les traîneaux sur lesquels sont posés les blocs. Ce n'est pas tout. L'oued est large et en pente douce jusqu'à la cote 67. Mais les Egyptiens vont faire démarrer la pyramide à la cote 60, une partie du socle rocheux étant conservée dans l'emprise du monument. Avantage : au lieu de partir de la cote 60, la rampe extérieure, implantée en continuité de l'oued, va elle aussi pouvoir partir de la cote 67 : 200 000 m³ de matériaux sont économisés. Les ouvriers vont ensuite dérocher le plateau autour du socle rocheux



DASSAULT SYSTEMES

Indices

Les blocs de calcaire de Toura couvraient tout l'édifice. Ils révèlent des joints et un surfacage d'une finesse exceptionnelle.

Détails de la barque solaire de Kheops. Elle montre le travail du bois et des cordages, seules techniques nécessaires au chantier dans l'hypothèse de Houdin (fabrication des traîneaux).

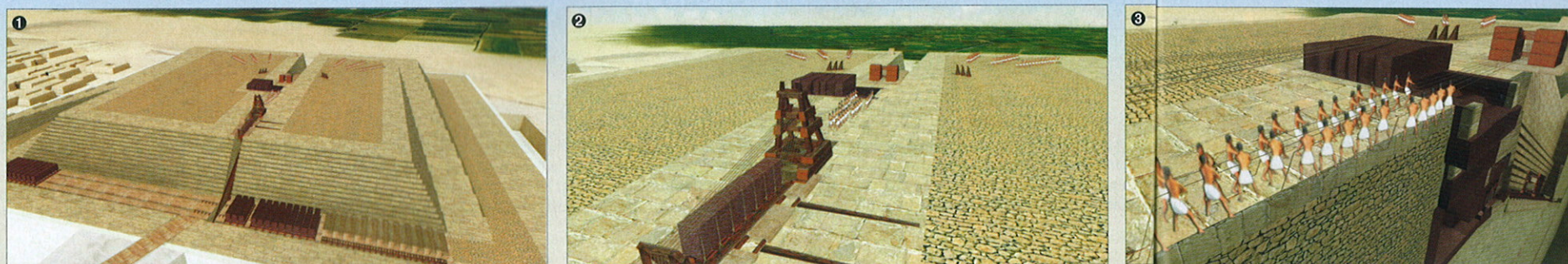
EDGAR BROTHIER

pour récupérer le niveau de la cote 60. Les blocs de calcaire ainsi dégagés seront taillés et immédiatement utilisés. D'où une nouvelle économie de 300 000 m³. Le chantier peut commencer. Le revêtement est posé en premier : des pierres venues des carrières de Toura, de l'autre côté du Nil. Elles dessinent la « ceinture » de la pyramide, permettant aux constructeurs de contrôler sa forme. Elles ont pour la plupart disparu (voir indices), mais à l'époque, leur calcaire d'une grande finesse et densité devait donner un bel aspect lisse au monument. L'extrême perfection de leurs joints et de leur surfacage étonne, car les Egyptiens dispo-

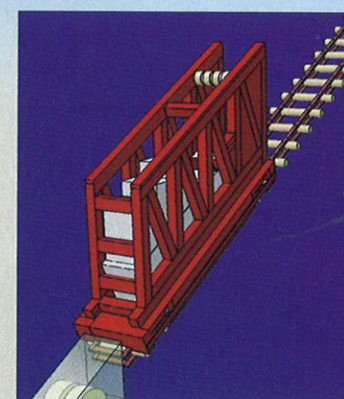
saient seulement d'outils de pierre et de cuivre. « Ce calcaire est tendre à la carrière, explique Jean-Pierre Houdin, mais le problème c'est que lorsqu'il arrive un peu plus tard sur le chantier, un calcin s'est formé, et il est devenu très difficile à travailler. » Le revêtement aurait donc, selon lui, été préparé directement à la carrière, les pierres étant taillées et surfacées côte à côte, puis affinées à la poudre de quartz. Après le derme, l'épiderme. A l'arrière des pierres de Toura, la maçonnerie de soutien est réalisée en blocs de calcaire local calibrés, sur environ 10 à 15 m : c'est dans cette épaisseur que sera construite la rampe inté-

rieure. Vient ensuite le remplissage en blocs de calcaire grossièrement équarris et en résidus de taille liés par un mortier de pierre. Tous les dix/quinze assises, les constructeurs opèrent un nivellement général sans que le chantier s'arrête. La rampe extérieure est construite dès le départ à sa longueur maximale, puis élevée par couches horizontales successives. Elle est divisée en deux voies égales, décalées en hauteur pour suivre l'élévation (voir le déroulé). Pendant qu'une voie sert au transport des matériaux, l'autre est en cours d'exhaussement. Les anciens Egyptiens avaient inventé le travail à flux tendu!

A. K.

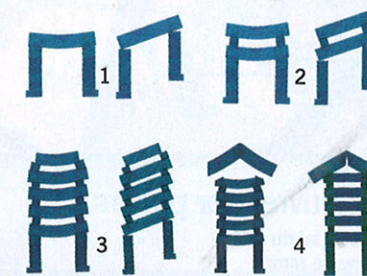


1 A partir de l'an 14, une seconde pyramide s'élève sur la première, en retrait de 20 mètres. Elle englobe les dispositifs de construction de la chambre du Roi. A son pied, sont déposées les poutres de granit qui seront hissées 2 et 3 pour en former le toit.



L'efficacité du chariot de contrepoids a été testée par Dassault Systèmes grâce à un logiciel de simulation industrielle.

Crash test sur granit



Trois des plafonds de la chambre du Roi présentent des fissures qui ont fait l'objet de spéculations : sont-elles apparues en cours de construction ? Est-ce pour cela que les Egyptiens ont accumulé les chambres au point de déplacer le corps du pharaon ? Pour savoir ce qui s'est passé, Dassault Systèmes décide de mettre en œuvre ses outils de simulation, ceux-là mêmes qu'on utilise pour les crash tests. Les informaticiens suivent les étapes de construction : ils posent un plafond après l'autre, et contrôlent l'effet du simple poids. Puis, à chaque étape, ajoutent un léger affaissement : on sait en effet que le mur sud de la chambre a bougé de 2 cm. Les contraintes s'exerçant sur la structure sont représentées par une échelle de couleurs : du bleu (quasi nulles) au rouge (point de rupture du granit). Un plafond, deux, trois, quatre, cinq, rien ne se passe (images 1, 2, 3). Pas plus avec l'ajout des chevrons. Puis c'est toute la charge de la maçonnerie pesant sur la chambre qui est simulée : la pyramide est terminée (4). Sous l'effet de la simple gravité, il n'y a toujours pas de craquements. Les chevrons font office de parapluie. Mais l'affaissement simultané du mur et des chevrons sud provoque enfin les ruptures attendues, visibles sur l'image 5 : les zones rouges correspondent aux fissures retrouvées dans la pyramide. Conclusion : l'affaissement a eu lieu à la toute fin de la construction, peut-être au moment du démontage de la rampe extérieure, qui a dû provoquer un léger déplacement du centre de gravité du monument. Cette hypothèse fera l'objet d'une prochaine simulation.



Indices
Une photographie du XIX^e siècle révèle un seuil en forme de « V » à l'entrée de la chambre du Roi : c'est par là que glissaient certaines cordes du contrepoids. Il a été rebouché depuis.

S'aider d'un contrepoids

Sur cette vue de la pyramide en coupe, les poutres sont hissées les unes après les autres sur un chariot élévateur (à gauche de l'image), jusqu'au niveau de la chambre du Roi. La force de traction des hommes (sur le sommet de la plate-forme) est amplifiée par l'ingénieux système d'un chariot de contrepoids installé dans la Grande Galerie (à droite).

De l'an 14 à l'an 15 : l'élévation de la chambre du Roi

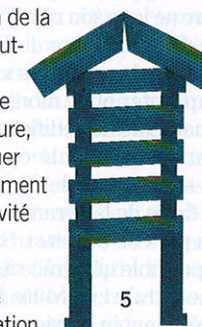
La chambre dite du Roi de la pyramide de Kheops accumule les originalités. Jamais un appartement funéraire n'aura été construit aussi haut dans le corps d'une pyramide : sa base se trouve en effet à 43 mètres. Une évolution dont les motivations ne sont pas claires. Religieuses pour favoriser l'élévation du mort dans l'« au-delà » ? Ou sécuritaires ? Car plus la chambre est haut dans la pyramide, moins elle supporte de charge et risque de s'effondrer sur le pharaon. Ce qui est une préoccupation constante des Egyptiens. Autre singularité : elle est surmontée d'un curieux dispositif de « chambres de déchar-

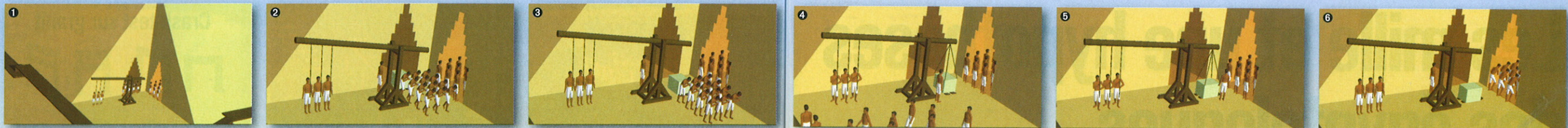
ge ». Soit une série de cinq plafonds de granit, entre lesquels sont ménagés des espaces, l'ensemble étant coiffé d'un toit en chevrons de calcaire (lire l'encadré p. 53). « C'est une sorte de tranchée blindée qui permet de disperser les charges plus haut dans la structure », selon l'architecte Jean-Pierre Houdin. Le problème d'une telle innovation, c'est qu'elle va obliger les constructeurs à élever, jusqu'à 60 mètres de hauteur, 43 poutres de granit dont le poids s'étage entre 27 et 63 tonnes. La portée des plafonds étant de 5,24 mètres, il faut en effet utiliser un matériau très résistant, qui ne risque pas

de rompre comme le calcaire. Mais aucun attelage humain n'est capable d'acheminer de telles charges à une telle hauteur. D'autant plus que la place manque à ces niveaux de la pyramide. Les constructeurs auraient donc imaginé un ingénieux système de contrepoids, installé à partir de Grande Galerie, dans le prolongement de la chambre du Roi. Selon cette hypothèse, c'est quasiment un deuxième chantier qui commence en l'an 14 du règne du pharaon. La pyramide est bâtie jusqu'au niveau 43, les ouvriers ont opéré un nivellement général, elle se présente comme une plate-

forme va s'élever une seconde pyramide en retrait de 20 mètres par rapport à la première, englobant la chambre du Roi et la Grande Galerie. Les poutres de granit sont montées jusqu'à la base de cette seconde pyramide par la grande rampe extérieure (image 1, ci-dessus). Puis hissées, au fur et à mesure de l'élévation de la chambre du Roi, aux niveaux 48, 51, 54 et 57, enfin 60, niveau du dernier plafond et du toit en chevrons, grâce au système de contrepoids de la Grande Galerie : un chariot à patins portant trois gros blocs de granit qui circule sur un train de rouleaux de bois. La force qu'il restitue diminue d'autant les besoins

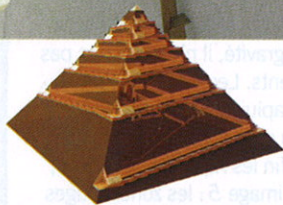
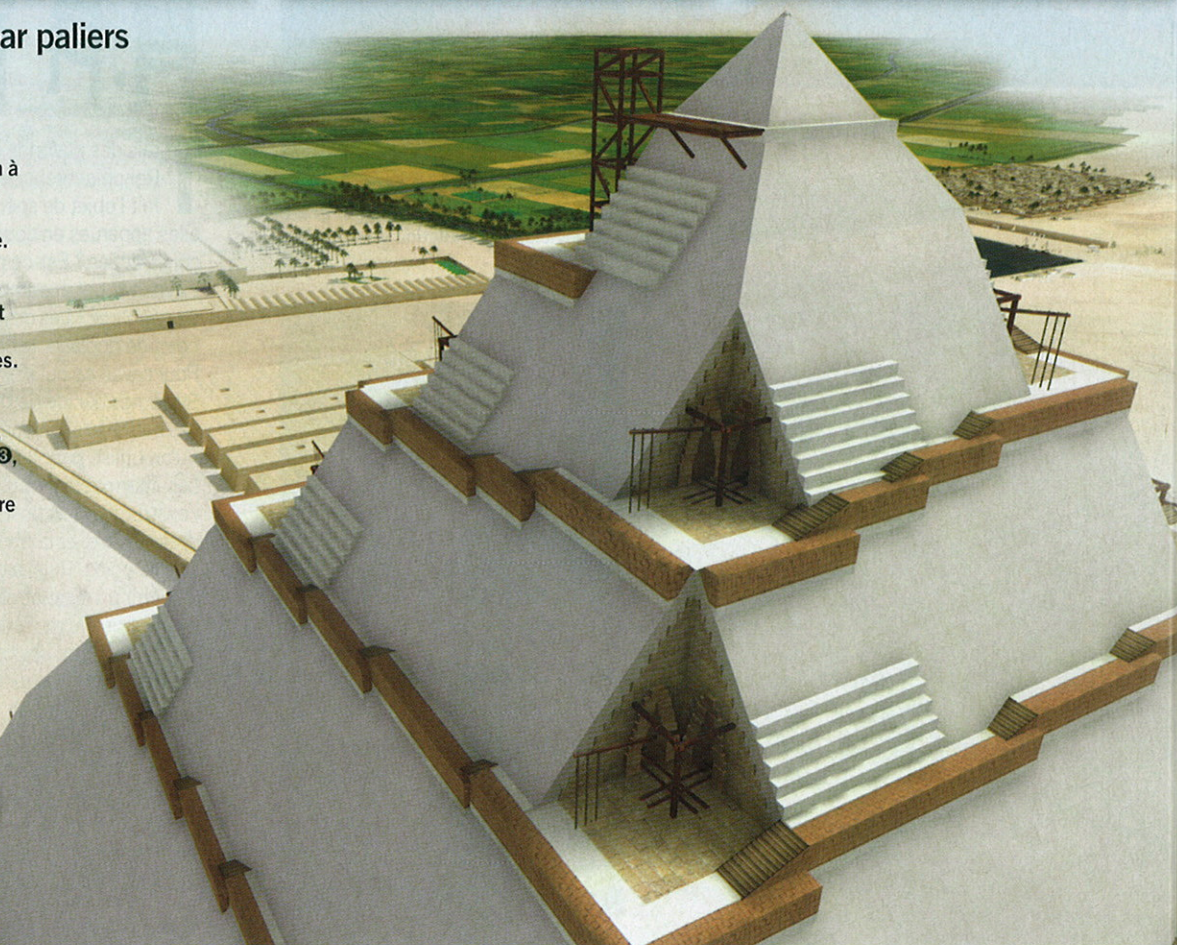
humains. Pour augmenter encore son efficacité, les constructeurs usent de quelques astuces, notamment dans la disposition des équipes de haleurs sur le chantier (voir la grande illustration centrale). Car s'il faut dix hommes pour tracter une tonne sur une pente à 8 %, il n'en faut plus que quatre s'ils manœuvrent sur une plateforme horizontale en partie haute de cette pente. La conception de la Grande galerie, véritable « grue de chantier », a influencé, selon Jean-Pierre Houdin, toute l'architecture intérieure de la pyramide, et notamment la géométrie spatiale des chambres et des couloirs. A. K.





Manœuvrer par paliers

Point capital du système de rampe intérieure, le palier à encoche ① permet d'effectuer la rotation à 90° des pierres pour passer d'une face à l'autre de la pyramide. Ci-dessus, la manœuvre simulée par ordinateur permet d'évaluer le nombre d'hommes nécessaires. Une première équipe arrive, longeant une face par l'intérieur ②, dépose son traîneau ③, redescend par une coursive extérieure ④, tandis que le traîneau est tourné grâce à une machine de levage ⑤. L'équipe de la face suivante prend alors le relais ⑥.

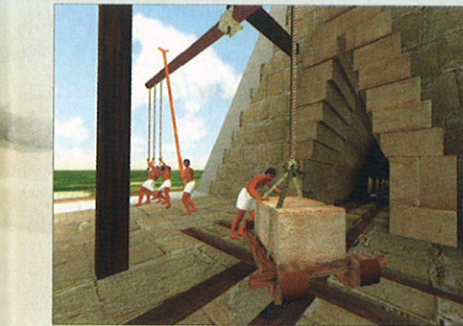


De l'an 15 à l'an 23 : l'astuce de la rampe intérieure

Aménagée dans l'«épiderme» de la pyramide dès les premières assises, la rampe intérieure ne joue son rôle qu'après la construction de la chambre du Roi. C'est à ce moment que les ouvriers vont commencer à l'emprunter pour monter les pierres dans les hauteurs de l'édifice. C'est une véritable épure géométrique : une succession de 21 galeries, parallèles aux faces de la pyramide, à trois mètres au plus près de celles-ci. Sa construction n'a été possible que grâce à une innovation architecturale : la voûte à encorbellement, expérimentée plusieurs dizaines d'années plus tôt dans la pyramide de Meïdoun, au

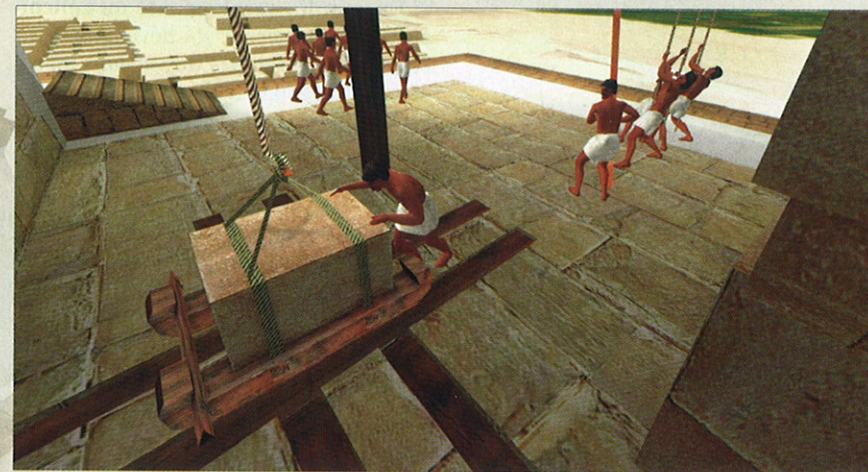
sud du Caire, un monument qui aurait connu plusieurs phases de construction avant d'être parachevé par le pharaon Snefrou (2431-2538 avant J.-C.). Cette nouvelle technique permet de supporter de lourdes charges et donc de bâtir des couloirs plus larges au cœur d'une masse de pierres. Partant de l'angle sud-est, au niveau +7 mètres, véritable base horizontale de Kheops, la rampe intérieure tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre : en imaginant une pente de 7 à 8 %, sa première volée arrive au niveau 21, base de la chambre de la Reine, la deuxième passe au-dessus des chevrons de l'entrée, la troisième

me au niveau 43, base de la chambre du Roi. « Elle grimpe tranquillement pendant environ quatorze ans, sans jamais gêner le chantier », résume Jean-Pierre Houdin. La pente s'accroît dans les dernières volées pour éviter tout chevauchement. L'effort des haleurs est plus important, mais les pierres à hisser plus petites et moins lourdes vers le sommet. A chaque volée, la rampe débouche sur un palier en encoche, ouvert sur l'extérieur, avant de repartir à angle droit, sur la face opposée (voir la grande illustration centrale). Ces paliers, plates-formes de plus de 100 m³, vont permettre la rotation des



Une rotation rapide

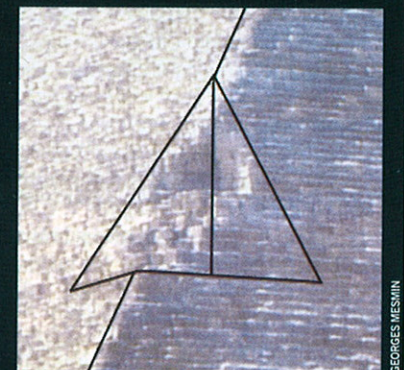
Après avoir modélisé les efforts de traction des hommes et le système de levage des pierres, l'équipe de Dassault Systèmes a créé une version 3D en temps réel du chantier. Il suffit de cinq hommes sur une plateforme et de quelques dizaines de secondes pour effectuer la manœuvre de rotation des traîneaux à chaque angle de la pyramide.



Indices



D'énigmatiques encoches apparaissent dans l'arête nord-est de la pyramide, sur ces photographies. L'amorce d'un palier, tel que l'imagine la théorie ?



traîneaux à 90 degrés : ils sont équipés d'une machine de levage, ancêtre de l'actuel « chadouf », qui est manœuvrée par une équipe de grutiers. Le chantier ne s'arrête jamais. Chaque équipe de haleurs est affectée à une face précise de la pyramide, d'où leur dénomination : équipe du nord, de l'ouest, du sud et de l'est. Et chacune, sur sa face, effectue des allers-retours continus entre un palier inférieur et supérieur de la pyramide : à l'aller, elles tractent le traîneau chargé d'un bloc de pierre ; arrivées sur l'assise en encoche, elles le déposent pour qu'il soit pris en charge par les grutiers, puis elles redescendent à

leur point de départ par une coursive extérieure afin d'éviter les croisements à l'intérieur de la galerie. Cette coursive en brique crue prend appui sur des blocs de parement non ravalés (lignes blanches sur l'illustration centrale). Grâce à ce système de relais, les blocs sont hissés, de volée en volée, au plus haut de la pyramide et le chantier se poursuit ainsi jusqu'au sommet. La grande rampe extérieure étant devenue inutile, elle est démontée et utilisée au fur et à mesure pour la construction des dernières assises, afin d'économiser les matériaux. Ce qui expliquerait pourquoi on n'a pas retrouvé de vestiges de cette immense

chaussée, une énigme qui intrigue toujours les archéologues lorsqu'ils imaginent ce type de dispositif (lire p. 56). Une fois le pyramidion posé, en l'an 20, commencent, à partir du niveau 146 et en redescendant vers la base, les travaux de parachèvement : rebouchage des encoches avec des blocs approvisionnés par la rampe intérieure, démontage des coursives extérieures et, enfin, le ravalement des blocs de façade restés bruts. Le chantier se termine à la fin de l'an 21 du règne de Kheops. La pyramide blanche et lisse se dresse de toute sa hauteur au sommet du plateau de Gizeh. A. K.

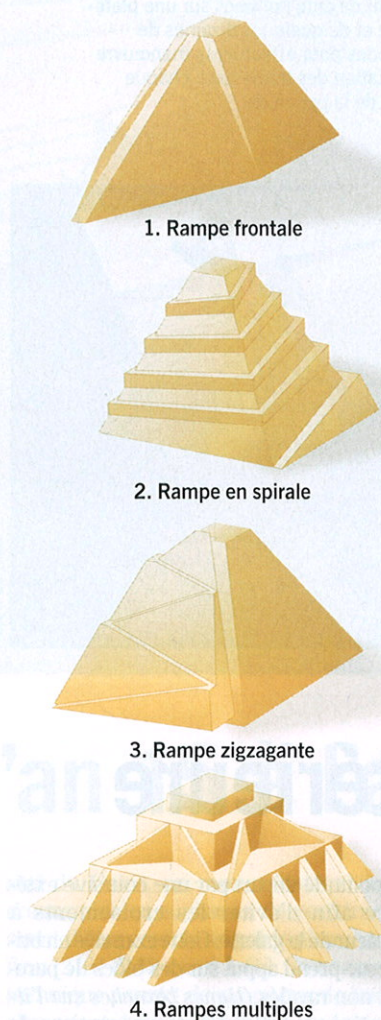
Les mille et une hypothèses des égyptologues...

Deux options principales ont été retenues au cours des siècles : celle des rampes pour tracter les pierres et celle des machines pour les élever.

Les Égyptiens n'ont laissé aucune information sur la façon dont ils ont bâti leurs pyramides. Le premier document à évoquer celle de Kheops (2538-2516 avant Jésus-Christ) est un recueil de contes et légendes dédié au souverain. Connue sous le nom de papyrus Westcar, le manuscrit date de 1600 av. J.-C., soit mille ans après le règne du pharaon, et ne dit pas le moindre mot sur la technique de construction. Le second, le plus célèbre, est celui de l'historien grec Hérodote d'Halicarnasse (482-425 avant J.-C.). Dans le Livre II de ses *Histoires*, il décrit dans quelles conditions a été édifiée la Grande Pyramide, indiquant notamment l'origine des blocs qui ont servi à sa construction. Des pierres dont il raconte que les Égyptiens durent les faire venir « depuis les carrières de la chaîne Arabique », et une fois « passées en barques sur l'autre rive [...] [les] traîner jusqu'à la montagne qu'on appelle la chaîne Libyque ». C'est le clergé égyptien qui lui donne ces informations, lors de son séjour sur les bords du Nil, entre 449 et 430 avant J.-C. Soit... deux mille ans après la mort du pharaon !

Au cours du temps, deux grands types d'explications se sont finalement dessinés à partir des témoignages d'Hérodote, et aussi de ceux de Diodore de Sicile (1^{er} siècle avant J.-C.) et Plin l'Ancien (23-79), pour tenter de résoudre les problèmes architecturaux liés à la construction de Kheops. Cette pyramide focalise en effet tous les intérêts : comment ont pu être acheminées ou soulevées des charges atteignant plus de soixante tonnes ?

Il y a d'abord l'option des « rampes », selon laquelle la construction n'a pu être réalisée qu'à l'aide de plans inclinés sur lesquels les blocs de pierre ont été tractés. Hérodote écrivait à ce propos : « [...] il fallut d'abord dix années de ce labeur écrasant pour construire la chaussée par laquelle [les ouvriers] traînaient les pierres - chaussée qui représente à mon avis un travail pres-



que aussi considérable que la pyramide... » Quelle qu'ait été la forme de ces hypothétiques rampes, elles devaient constituer d'énormes structures. Voici les principales propositions émises concernant Kheops (schémas ci-dessus) :

1. La rampe unique ou frontale, perpendiculaire au monument. Pour monter jus-

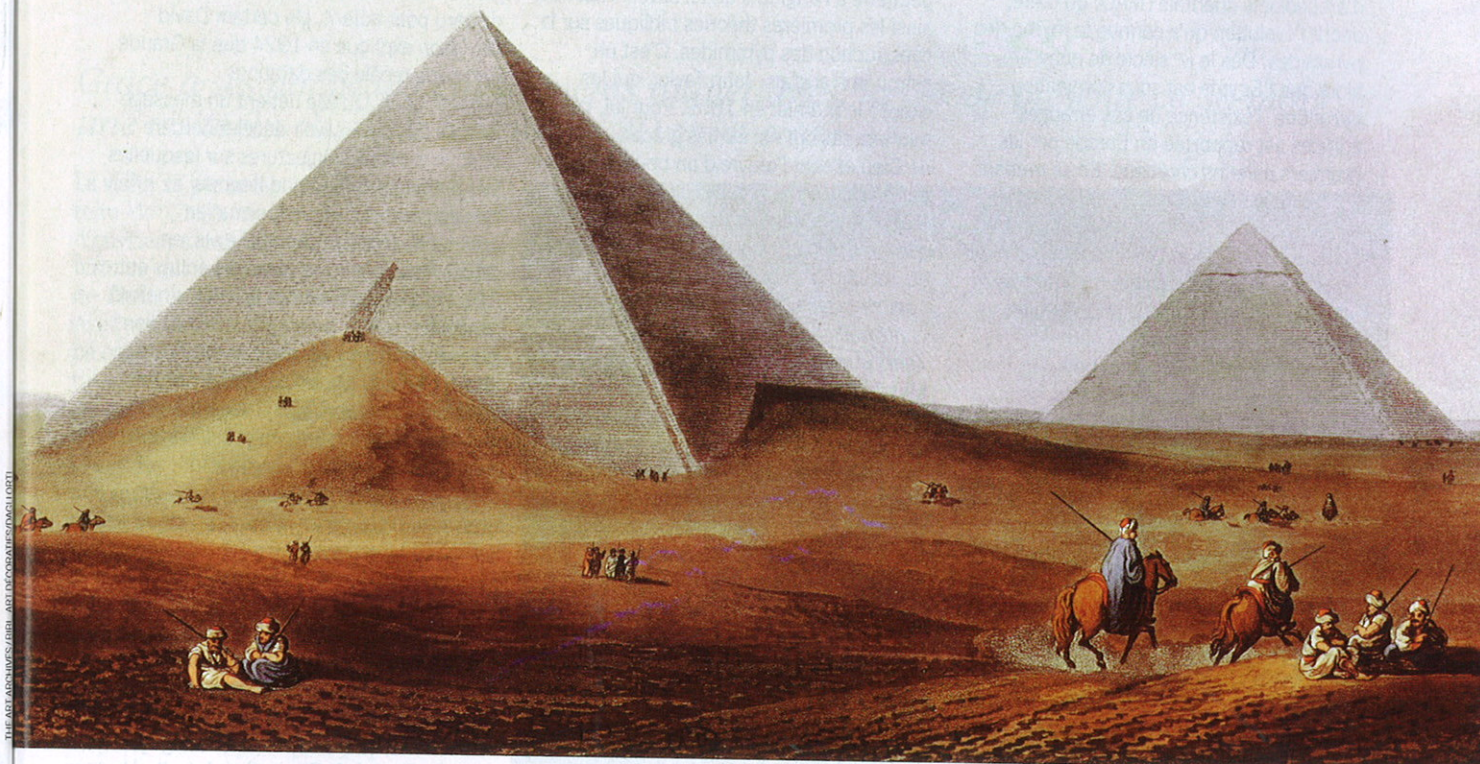
qu'au pyramidion de Kheops, une rampe avec une pente de 8 % aurait mesuré 1,8 km sur terrain plat, et aurait dû s'allonger sur 2,5 km si elle avait dû descendre dans la vallée. Avec une pente de 5,75 %, elle aurait mesuré 3,3 km, et atteint le Nil...

2. En spirale, enveloppante ou hélicoïdale. L'hypothèse a été développée par l'égyptologue Georges Goyon dans les années 1990. Partant de l'angle sud-ouest de la pyramide, la rampe aurait pu se développer le long de la face ouest, puis tourner autour du volume jusqu'à l'assise du pyramidion. En 1993, lors de sondages, l'actuel directeur du Conseil suprême des antiquités égyptiennes, Zahi Hawass, a trouvé des fondations de murs de pierres détruits, face à l'angle sud-ouest de la grande pyramide. Mais ont-ils un lien quelconque avec une antique rampe ? Et comment contrôler l'élévation d'un monument, et notamment ses angles, s'il est « enveloppé » d'une chaussée de pierres ?

3. Zigzagantes sur une face. C'est l'hypothèse qu'a avancée, en 1912, Uvo Hölscher, de l'Institut oriental de Chicago.

4. La configuration à rampes multiples. Cette dernière proposition associe différents types de plans inclinés.

Les vestiges archéologiques et manuscrits qui pourraient conforter ces hypothèses sont rares. Un traîneau fossile a bien été retrouvé sur le site des pyramides de Dahchour, au sud de Gizeh, confirmant l'usage de ce type d'appareil. L'égyptologue Jean-Pierre Adam (CNRS) évoque par ailleurs le texte du papyrus Anastasi (xix^e dynastie, 1293-1188 avant J.-C.) qui décrit très précisément une construction de rampe : « Soit une rampe de 730 coudées (382 mètres), large de 55 coudées (29 m), comprenant 120 compartiments remplis de roseaux et de poutres qui atteint 60 coudées de hauteur (31,40 m)... » Plusieurs monuments ont de plus conservé des vestiges de ces rampes de chantier (aux murs de soutène-



Dès les premiers siècles de notre ère, les voyageurs s'interrogent sur Kheops et Kephren, ici représentées par Luigi Mayer (xix^e siècle).

ment en briques crues, et au remplissage d'argile et de gravats). Celui d'Aménemhat 1^{er} (fondateur de la xii^e dynastie), celui de Sésostri 1^{er}, son fils, et les pyramides de Licht, un ensemble funéraire du Moyen Empire situé à 60 kilomètres au sud du Caire. Trois restes de rampes ont aussi été retrouvés sur le site de Méïdoun, à 100 kilomètres au sud du Caire.

A Gizeh, certains petits vestiges ont été mis au jour, rattachés à quelques mastabas (tombeaux monumentaux en forme de trapèze plus anciens que les pyramides). Mais aucune trace importante d'accumulation de gravats à proximité des grandes pyramides, ce qu'une construction de rampe gigantesque n'aurait pas manqué de laisser. Un problème que résout l'hypothèse de Jean-Pierre Houdin (lire p. 54). Du côté de l'iconographie, une seule représentation de rampe est connue dans la tombe de Rekhmirê (Nouvel Empire), à Thèbes.

La seconde grande option est celle des « machinistes » qui s'appuient sur les « machines propres à élever des fardeaux » dont parle Hérodote. Mais ils se font de moins en moins entendre. Pour la plupart des auteurs, les systèmes de levage posent

On a même imaginé une sorte de béton antique pour couler les pierres sur place

en effet problème. Les manœuvres deviennent impossibles à partir de certaines hauteurs du monument (pour des raisons de poussées et d'appuis qu'auraient exigés la mise en place de ces machines). Soulever des blocs de plusieurs tonnes aurait de plus nécessité des systèmes dévoreurs

d'une quantité de bois tout simplement indisponible. Autre argument : l'ignorance, en 2500 avant J.-C. en Egypte, des dispositifs mécaniques à axe permettant la rotation (poulie, palan, etc.).

Une dernière hypothèse a récemment fait grand bruit : celle du béton, soutenue par le géochimiste Joseph Davidovits. Selon lui, la pyramide de Kheops aurait été bâtie à partir de blocs de pierre reconstituée coulés sur place à l'aide d'un antique béton géopolymère. Des analyses réalisées par des chercheurs américains et français publiés dans le *Journal of the American Ceramic Society* ont semblé accréditer cette thèse. Mais les scientifiques ont travaillé à partir d'échantillons qu'ils n'ont pas prélevés eux-mêmes. Et l'on peut se demander pourquoi, ayant découvert une technique si pratique, les Égyptiens ne l'ont plus utilisée ensuite, notamment pour construire les vastes temples du Nouvel Empire.

De l'astronomie au culte d'Isis

Si les auteurs antiques n'ont pas douté de la fonction des monuments imposants situés sur le plateau de Gizeh – c'était des tombeaux royaux –, les spéculations se sont développées au fil des siècles. Dans son dernier ouvrage*, Jean-Pierre Corteggiani, de l'Institut français d'archéologie orientale (IFAO) du Caire, décrit l'évolution qu'a connue le mythe des pyramides. Dès le IV^e siècle de notre ère, alors que l'Égypte est sous domination byzantine, l'existence de ces étranges édifices est rapportée en Europe par les premiers pèlerins chrétiens. En se rendant sur les lieux saints de Judée ou à Sainte-Catherine (en 337, l'impératrice byzantine Hélène y a fait élever une chapelle, au pied du mont Sinäï), les voyageurs s'interrogent sur la signification de ces gigantesques constructions aux formes si peu communes. S'agit-il vraiment de sépultures ? Ne serait-ce pas des monuments astronomiques ? Après la conquête arabe de 642, les pyramides continuent à faire l'objet de légendes fabuleuses, « des prêtres y auraient déposé les secrets de leur science ». Une accumulation d'histoires que les Croisés

rapporteront à leur tour en Europe, bien des siècles plus tard. Mais c'est surtout au milieu du XIX^e siècle qu'explorent toutes sortes de théories. Tout d'abord, la paternité du monument est mise en doute : les Égyptiens de l'Antiquité ne sauraient en être les auteurs, seule une puissance divine peut être à l'origine d'un tel savoir. Naissent ainsi les premières théories bibliques sur la construction des pyramides. C'est un astronome anglais, John Taylor, qui les expose le premier en 1859. Pour lui, ces monuments ont été édifiés grâce au souffle de Dieu et sont l'œuvre d'un peuple élu. Un autre astronome, écossais celui-là, Charles Piazzi Smyth, tentera de prouver, en 1865, que les Égyptiens connaissaient la valeur du nombre pi, « qu'ils avaient utilisé un "pouce pyramidal" équivalent à la cinquante millionsième partie du diamètre de la Terre » (nombre qui ne sera connu en Mésopotamie que cinq siècles plus tard) et que les Hébreux en sont les auteurs. En 1883, l'astronome Richard Proctor, reprenant une idée du Français Edme-François Jomard, géographe de l'expédition d'Égypte de Bonaparte, prétend quant à lui que le monument n'est rien d'autre qu'un

observatoire. « Il aurait d'abord été bâti jusqu'à la cinquième assise, au niveau de la chambre du Roi, la pente du couloir ascendant servant à viser Alpha du Dragon (l'étoile la plus proche du nord réel au début du III^e millénaire avant J.-C.), et celle de la Grande Galerie, Alpha du Centaure ». Mais les liens avec le Livre Saint n'ont pas disparu pour autant. Un certain David Davidson explique en 1924 que la Grande Pyramide recèle des datations prophétiques. Qu'elle détient un message céleste qu'il faut savoir déceler derrière chaque mesure. Conjectures sur lesquelles se jettera aussitôt le fondateur du mouvement ésotérique rosicrucien américain, Harvey Spencer Lewis, en 1936. Dans plusieurs ouvrages édités entre 1957 et 1972, l'écossais Adam Rutheford poursuivra cette quête impossible de liens entre les écrits bibliques et la construction des pyramides. Quant au mathématicien André Pochan, en 1971, il verra dans ce tombeau royal un lieu d'initiation au culte d'Isis.

* Les Grandes Pyramides, chronique d'un mythe, Jean-Pierre Corteggiani, Gallimard, collection « Découvertes ».

●●● Le mystère des pyramides ne se nourrit pas seulement de ces problèmes de rampes ou de machines. Il y a aussi leurs... anomalies. Kheops, à nouveau, a fait l'objet de nombreuses explorations. Car elle présente un plan qui ne ressemble à aucun autre, avec trois chambres étagées dans son massif de 146 mètres de haut. Une chambre souterraine, creusée à 30 mètres de profondeur, une chambre dite de la Reine qui n'a en réalité jamais abrité la moindre épouse royale, et une chambre dite du Roi où se trouve un sarcophage vide. Dès la fin des années 1980, différentes expéditions scientifiques ont eu recours à plusieurs procédés techniques telle la micro-gravimétrie pour s'efforcer de détecter des cavités (densité anormalement basse) à l'intérieur du monument. Et depuis des années, l'architecte français Gilles Dormion se bat pour défendre son idée d'une cache secrète, se trouvant sous la chambre de la Reine, qui aurait accueilli la dépouille de Kheops (lire *Sciences et Avenir* n° 691, septembre 2004).

Autre énigme : les quatre boyaux de 20 centimètres carrés qui traversent le monument, deux à partir de la chambre de la Reine, deux à partir de la chambre du Roi.



Selon cette gravure de 1891, dans « la Nature », Kheops aurait été utilisée comme observatoire par les astronomes de l'ancienne Égypte.

S'agit-il de conduits de ventilation, de dispositifs sacrés permettant à « l'âme » de Pharaon de s'élever ? En 1992, sous la direction de l'Institut archéologique allemand, Rudolph Gantenbrink tente leur exploration. Après l'envoi d'un robot dans les conduits de la chambre du Roi, il s'attaque l'année suivante à ceux de la chambre de la Reine. Dans les deux cas, l'expérience tourne court.

Dix ans plus tard, en 2002, une tentative semblable est menée par Zahi Hawass et son robot Pyramid Rover. Sans plus de succès (lire *Sciences et Avenir* n° 669, novembre 2002). Mais l'archéologue égyptien n'a pas dit son dernier mot et envisage une nouvelle exploration dans un futur proche.

Bernadette Arnaud

Pour en savoir plus

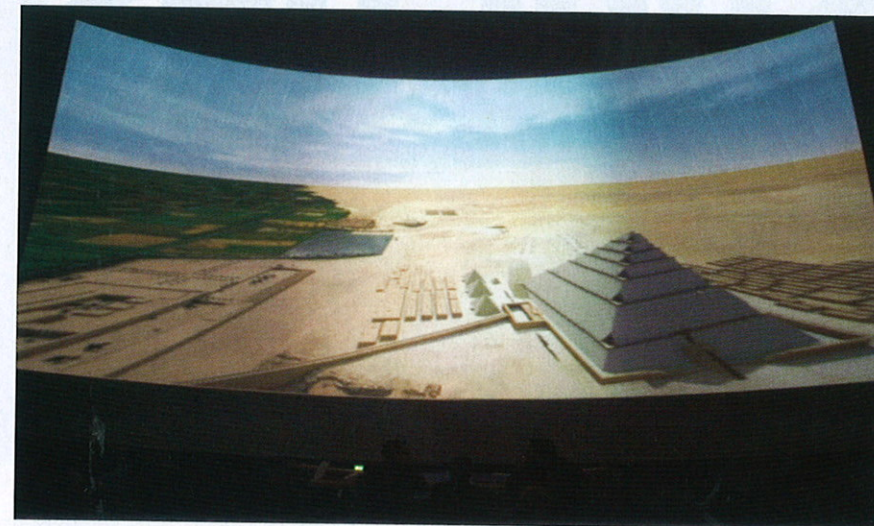
Les Pyramides d'Égypte, Jean-Pierre Adam et Christianne Ziegler, Hachette, 1999.
Trésors des pyramides, de Zahi Hawass, Sélection du Reader's Digest, 2003.
The Complete Pyramids, de Mark Lehner, Thames & Hudson, Londres 1997.
Les Pyramides. L'enquête, Eric Guerrier, éditions Cheminements, 2006.
La Chambre de Chéops, Gilles Dormion, Fayard, 2004.

Visite de la pyramide en direct et en 3D !

Grâce à ses nouveaux équipements numériques, la Géode présente ce 30 mars une visite du chantier Kheops en 3D et en temps réel.

La visite se passe il y a 4500 ans sur le plateau de Gizeh en Égypte. Des milliers d'ouvriers s'activent tels des fourmis pour bâtir ce qui sera l'œuvre la plus colossale de l'humanité : la pyramide de Kheops. Avec ses lunettes 3D, le « touriste » moderne est conduit au cœur du chantier : sur la rampe externe, sur la rampe interne, dans la chambre du Roi... Il peut même suivre en direct les efforts terribles des hommes qui tirent des blocs de pierre de plusieurs tonnes ou encore la technique ingénieuse de contrepoids qui aurait permis de hisser des poutres de granit de 60 tonnes au-dessus de la chambre du Roi. Ce voyage virtuel est l'aboutissement du minutieux travail de reconstitution mené par l'architecte Jean-Pierre Houdin et les équipes de Dassault Systemes. Présenté le 30 mars à la Géode à Paris, il témoigne aussi des nouveaux moyens numériques qui équipent désormais la plus grande salle hémisphérique d'Europe. « Avec cette technologie, nous allons pouvoir projeter toutes sortes d'images et notamment de la 3D relief temps réel, technique utilisée dans le cas de Kheops », souligne Laurent Dondey, le directeur général de la Géode.

Petit précis de vocabulaire à propos de la 3D relief temps réel. 3D, car le spectateur a l'impression d'évoluer dans un environnement en trois dimensions. Relief, car certains éléments du décor ou encore des personnages, semblent jaillir de l'écran. Effet « Attrape-moi, si tu peux » garanti. Temps réel, car il est possible de se promener à sa guise et en temps réel dans ces images. Dans le cas de la projection du 30 mars, c'est Jean-Pierre Houdin qui commande au « temps réel ». Il peut, en fonction de ses explications ou des questions du public, se diriger vers tel ou tel endroit de la pyramide. « Il n'y avait pas de meilleurs moyens pour expliquer un chantier aussi complexe », souligne Mehdi Tayoubi, responsable du projet Kheops chez Dassault Systemes. « La



La technique 3D relief temps réel et les 400 m² de l'écran de la Géode en font une salle unique en Europe.

des artistes qui viendront faire de la création d'images virtuelles en direct. »

Ce type d'images est déjà connu par les utilisateurs de jeux vidéo. Mais à la Géode, cette 3D relief arrive sur un écran de 400 m² hémisphérique qui enveloppe le spectateur ! Immersion totale donc. Les images sont envoyées par les six nouveaux projecteurs qui équipent la salle. Ils fonctionnent par deux : l'un est dédié à l'œil droit, l'autre à l'œil gauche. Les images des trois paires sont assemblées pour composer l'image unique de 400 m². Cette technologie permettra aussi de bénéficier de la haute définition. Les projecteurs ont une résolution de 1400 x 1050 pixels. Les images se chevauchent dans la partie centrale de l'écran. On obtient alors la résolution impressionnante de 3220 x 1050 pixels toujours sur le gigantesque écran. Le tout couplé bien sûr au système sonore de la Géode : 21 000 watts !

Olivier Hertel

http://www.lageode.fr