

Dossier de Presse

Kheops Renaissance

L'aventure continue...



DS DASSAULT
SYSTEMES



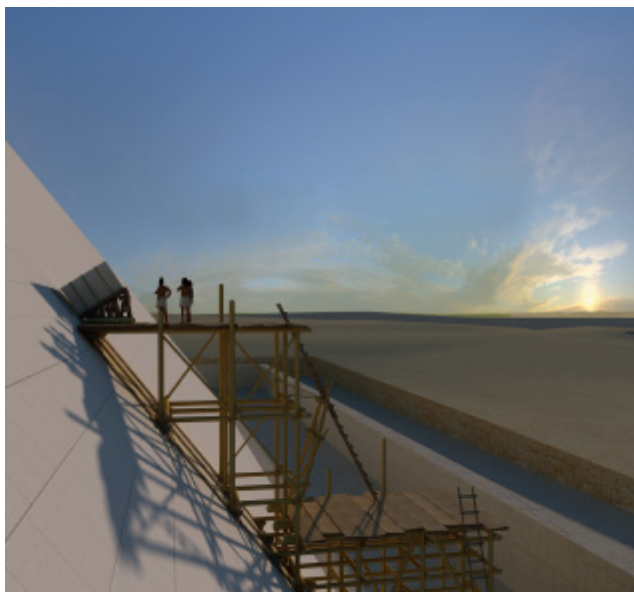
Sommaire

- 01/
Introduction
- 02/
Le mystère de la Grande Pyramide
- 03/
Jean-Pierre Houdin et Dassault Systèmes
- 04/
La Révolution 3D interactive pour tous
- 05/
Des antichambres dans la pyramide de Kheops
- 06/
Dassault Systèmes sur le plateau de Gizeh
- \02
Kheops, un géant dans le désert
- \04
La quête d'un homme
- \06
L'apport scientifique de la 3D à la théorie
- \08
Kheops Renaissance, la théorie affinée
- \10
La recherche d'une preuve sur le terrain
- \12
La Géode, partenaire de Kheops 3D





Introduction



Entre outils du futur et exploration du passé, l'aventure continue.

Le 30 mars 2007 se déroulait dans le cadre futuriste de la Géode un étonnant voyage dans le temps et l'espace. L'architecte français Jean-Pierre Houdin entraînait une salle comble dans une Egypte virtuelle pour lui faire revivre, avec un réalisme que seule la 3D relief peut offrir, la construction de la pyramide de Kheops. Devant 400 personnes munies de lunettes 3D, il révélait sa théorie relative au chantier de la pyramide, la seule à expliquer réellement toutes les phases de la construction de la dernière des sept merveilles du monde antique encore debout.

A l'origine de cet événement,

la passion d'un homme pour une énigme vieille de 4500 ans, et une rencontre avec d'autres passionnés que rien ne destinait a priori à se retrouver autour de ce projet. La Grande Pyramide entre dans la vie de Jean-Pierre Houdin en 1999. Pour cet architecte féru de nouvelles technologies et de 3D, le mystère, jamais élucidé, de sa construction tourne à l'obsession. Riche de son expérience d'architecte, Jean-Pierre considère déjà la pyramide dans l'espace pour mieux la comprendre. Cette démarche originale lui permet d'élaborer peu à peu sa théorie. Mais pour aller plus loin, il a besoin d'outils puissants. C'est là que Dassault Systèmes, leader mondial des logiciels « 3D temps réel », entre en scène.

En 2005,

l'éditeur a lancé son programme de mécénat technique « Passion for Innovation », destiné à accueillir des projets originaux pouvant être réalisés à l'aide de ses solutions. Dassault Systèmes dispose de nouveaux outils 3D permettant de concevoir et simuler en trois dimensions les plus beaux projets industriels de notre temps. Des projets « irréalisables » hier encore, et qui, aujourd'hui, défient la raison et bousculent les genres établis. En permettant, par exemple, de concevoir un avion géant, un immeuble futuriste ou une simple voiture en un temps record, les outils de 3D industrielle permettent de penser différemment, donc d'innover.

Mais la notion d'innovation devrait-elle forcément être liée au futur ? Ne pourrait-elle pas aider à revisiter le passé au service d'idées neuves ?

Séduit par la passion de Jean- Pierre Houdin,

par la rigueur de sa démarche et motivé par le défi, Dassault Systèmes accueille l'architecte dans « Passion for Innovation ». Pendant deux ans, ses équipes d'ingénieurs se mobilisent afin de passer l'ensemble de la théorie au crible d'outils scientifiques 3D. Modélisation 3D, simulations mécaniques, tout est mis en œuvre pour en vérifier la validité scientifique. Au passage, les ingénieurs en profitent pour retracer, pour la toute première fois, l'historique des fissures de la Chambre du Roi et mettre fin à tous les doutes concernant le talent des bâtisseurs égyptiens. C'est aussi la première fois qu'une théorie expliquant de A à Z la construction de la pyramide est ainsi validée par les outils logiciels 3D utilisés par les plus grands groupes industriels. De tels résultats se devaient d'être partagés avec le plus grand nombre. Là encore, Dassault Systèmes possède les outils adéquats : la 3D interactive en tant que langage universel. Ne dit-on pas qu'un bon dessin vaut mieux qu'une longue histoire ? Dassault Systèmes est persuadé que faire vivre une expérience, immerger le public au cœur même du chantier de la pyramide vaut tous les discours, toutes les images. Et c'est la révélation du 30 mars, depuis régulièrement partagée à la Géode trois fois par semaine et quotidiennement sur Internet par des millions d'Internauts.

Mais l'aventure ne s'arrête pas là.

Le retentissement est énorme, à tel point qu'un documentaire TV centré sur la théorie de Jean-Pierre est tourné, mêlant prises de vues en Egypte et images de synthèse extraites de l'univers 3D élaboré par Dassault Systèmes.





Au cours du tournage,

l'égyptologue américain Bob Brier visite une encoche située sur l'arête Nord-Est de la pyramide, celle-là même que Jean-Pierre a toujours considérée comme un indice à l'appui de sa théorie. Bob en redescend avec vingt minutes de vidéo, des photos et des relevés. Il n'en faut pas plus pour susciter à nouveau la réflexion de Jean-Pierre. Sur cette base, il affine encore sa théorie avec les équipes de Dassault Systèmes. Exploitant les données recueillies par Bob Brier, celles-ci modélisent en 3D ce qu'on appelle désormais la « Bob's Room » et procèdent à de nouvelles simulations sous la direction d'un Jean-Pierre Houdin qui s'intéresse maintenant non seulement à Kheops, mais à toutes les pyramides de la IV^e Dynastie entre lesquelles il établit une « filiation » logique d'un point de vue architectural.

Parallèlement,

en quête de moyens d'investigation non-destructifs pour trouver sur le terrain les preuves péremptoires de la théorie, l'équipe procède à des simulations thermiques pour vérifier que la thermographie infrarouge serait une technique possible. Et puis derrière la pyramide, il ne faut pas oublier celui qui l'a inspirée afin d'y reposer pour l'éternité : Kheops. Les textes nous apprennent que le grand roi y a bien été inhumé. Là encore, le déroulement des funérailles et l'itinéraire généralement admis pour la procession intriguent Jean-Pierre Houdin, tout comme certaines complications gratuites dans l'architecture interne du monument.

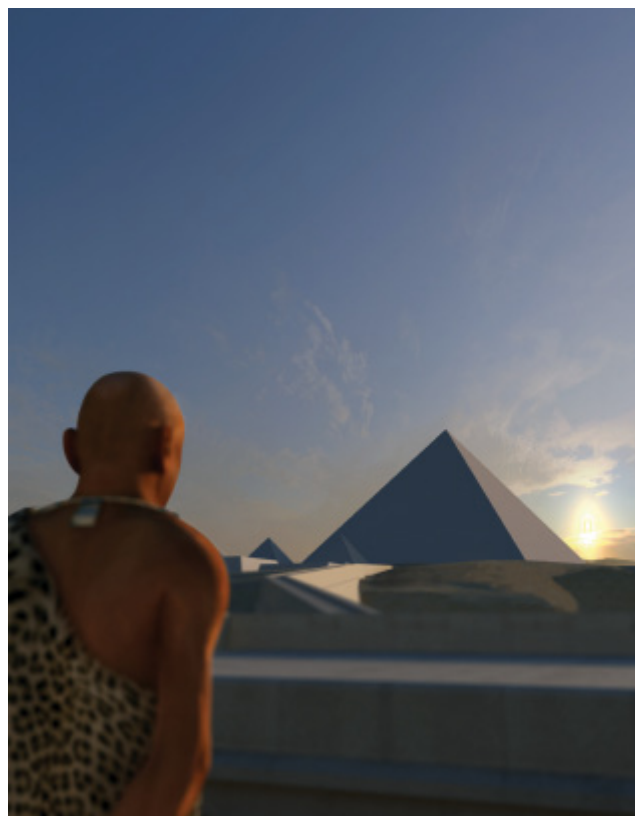
Un autre mystère auquel l'architecte travaille d'arrache-pied mais sur lequel il n'avait encore jusqu'ici rien révélé.

Encore deux ans de travail intensif

sous la direction d'un Jean-Pierre plus passionné que jamais, et il est à nouveau temps de partager les résultats de ce qui est devenu une véritable quête. Celle d'un

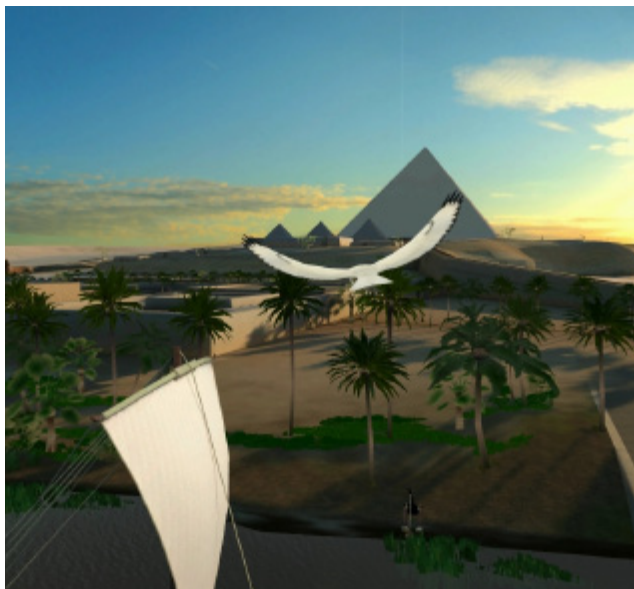
homme, d'un architecte fasciné par le génie de ses prédécesseurs égyptiens. Celle aussi d'une équipe d'ingénieurs respectueux de l'intelligence remarquable de ces bâtisseurs qui, à l'aide de techniques et moyens rudimentaires comparés aux ordinateurs et machines modernes, ont conçu et bâti la pyramide du grand roi. C'est donc un nouveau et surprenant voyage dans le temps et l'espace que proposent Jean-Pierre Houdin et Dassault Systèmes, qui bouleversera pour toujours notre façon de voir le chef-d'œuvre de Kheops. Une nouvelle fois, les outils du futur vont permettre d'explorer le passé.

Plus que jamais,
l'aventure Kheops continue.





Kheops, un géant dans le désert



La dernière merveille du monde

Par définition, une pyramide est un monument doté de faces triangulaires ayant un polygone pour base et un sommet commun. Pour les historiens, il s'agit d'une sépulture royale de l'Égypte ancienne. Pour l'humanité toute entière, les trois pyramides de Kheops, Khephren et Mykerinos, dressées sur le plateau de Gizeh, aux portes du Caire, constituent à la fois un trésor et une énigme.

De ces pyramides,

on sait qu'elles furent conçues pour abriter les dépouilles de trois pharaons, près de trois millénaires avant notre ère. Si le plus impressionnant de ces colosses de pierres, la pyramide de Kheops, a été contemplé et photographié un nombre incalculable de fois, ses entrailles demeurent toujours un mystère, évocateur de trésors fabuleux et de malédictions légendaires. On dit de la Grande Pyramide qu'elle est la dernière des sept merveilles du monde encore existante, la seule qui ait résisté jusqu'ici à la folie des hommes et à la colère des éléments.

Du haut de ses 146 m,

elle fut jusqu'à la construction de la tour Eiffel le monument le plus élevé de l'Histoire. Et pourtant on ne sait toujours pas comment et en combien de temps elle a été construite par des hommes ne connaissant ni le fer, ni la roue, ni la poulie. Et l'on ignore aussi quels secrets elle pourrait bien encore receler sous ses parois de pierres.

Témoin de 4 500 ans d'Histoire,

la pyramide de Kheops a vu défiler les plus grands hommes de ce monde. Des hommes qui ont admiré la démesure de ce qu'elle symbolise, qui ont rêvé de conquêtes infinies ou d'une vie immortelle. Puissants éphémères comme quidams de tous ces siècles passés sont venus arpenter ses pierres. Certains, enivrés par cette étrange sensation, se sont dit qu'une telle démesure ne pouvait être humaine et que seule une civilisation inconnue, lointaine, avait pu réaliser un tel prodige...





Le mystère de la Grande Pyramide



La Grande Pyramide entre mythe et réalité

A travers des âges, le secret de la construction de la pyramide de Kheops s'est perdu. Aussi étonnant que cela puisse paraître, aucun texte d'époque n'explique la construction de la septième merveille du monde. Si l'on écarte d'emblée les théories fantaisistes à base d'extra-terrestres ou d'Atlantes, les tentatives d'explication de la construction de la Grande Pyramide s'articulent autour de trois axes :

Les machines /

Instruments semblables à des grues en bois servant à hisser les blocs de pierre à flanc de pyramide.

La pente des faces de Kheops dépassant 51° , comment hisser dans ces conditions des blocs pesant jusqu'à 60 tonnes ?

Les grandes rampes extérieures /

Une ou plusieurs rampes appuyées sur les faces de la pyramide auraient permis d'acheminer les blocs au cours de la construction. Simple, mais pour aller jusqu'au sommet de la pyramide, le volume d'un tel outillage serait le double de celui de la pyramide elle-même. Peu vraisemblable.

La rampe enveloppante en spirale /

une rampe extérieure en colimaçon enveloppe la pyramide et progresse au fur et à mesure de sa construction. Hélas une telle rampe gêne le contrôle du chantier en masquant les arêtes. De plus, la rotation des blocs dans les angles est hasardeuse.

L'inconvénient essentiel de ces hypothèses est de ne pas traiter correctement l'ensemble de la construction du monument. Toutes se heurtent à une impossibilité à un moment ou à un autre. La raison est fort simple : le problème n'a été ni appréhendé globalement, ni posé correctement.

Lorsque Jean-Pierre Houdin

aborde le « mystère » de la construction de Kheops, il le fait en tant qu'architecte, avec son savoir-faire et son vécu de bâtisseur. C'est ce qui le conduit à distinguer dans le chantier de la Grande Pyramide trois problématiques distinctes :

\ La construction d'un énorme volume en un minimum de temps

\ La construction d'une chambre à plafond plat à 43 m de haut au cœur de l'édifice

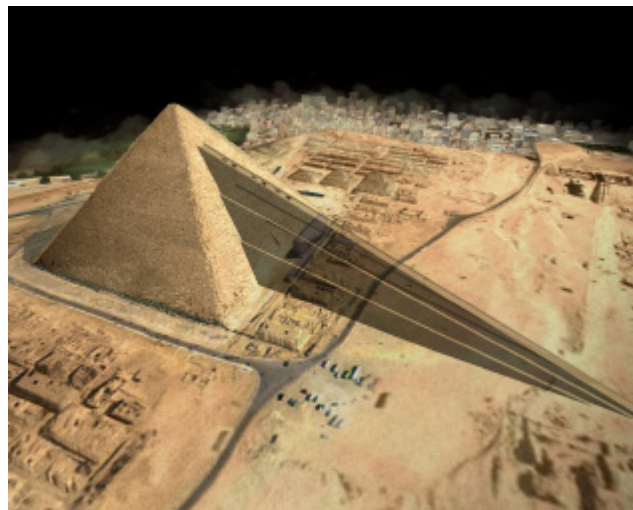
\ La construction d'un monument de 146 mètres de haut

Le volume, la Chambre du Roi et la hauteur :

les trois phases d'un chantier hors du commun qui, traitées une à une par la solution la plus appropriée, vont permettre d'expliquer l'intégralité de sa construction en répondant à toutes les questions qu'elle suscite depuis si longtemps.

La quête d'un homme :

un architecte qui depuis maintenant plus de douze ans s'évertue à mettre ses pas dans ceux de ses illustres prédécesseurs...





La quête d'un homme



L'homme derrière la théorie : Jean-Pierre Houdin par lui-même

Je suis né en 1951 à Paris, mais j'ai grandi à Abidjan, en Afrique, où mon père dirigeait alors une entreprise de BTP. Petit, je passais ainsi mon temps libre sur les chantiers, pendant que ma mère, médecin, prenait soin de ses malades dans un dispensaire de brousse. Mon intérêt pour le monde de la construction est sans doute né au cours de cette première époque de ma vie. De retour à Paris, et après mon baccalauréat, j'ai intégré tout naturellement les Beaux-Arts, section architecture...

Diplômé en 1976, je me lance comme architecte indépendant, profession que j'exercerai pendant vingt ans. Je participe à la construction de nombreux édifices d'habitations et de bureaux en Ile-de-France. Parallèlement, avec ma femme Michelle et notre ami Laurent, nous ouvrons un salon, galerie d'art aux activités avant-gardistes (« Les Enfants Gâtés »), qui accueille pendant dix ans des dizaines de jeunes artistes, et devient un des lieux du Paris artistique au tournant des années 80-90.

En 1996, Michelle me convainc de tourner une page et nous décidons de prendre une année sabbatique à New York ! Je pars sans programme précis mais avec mille idées en tête : j'ai envie d'apprendre à nouveau et de travailler librement, sans contraintes, mais avec passion... C'est l'époque rêvée pour ce genre d'idées, puisque ces années voient Internet se développer de façon incroyable. Cette nouvelle donne apporte au monde de nouvelles perspectives dans tous les domaines, et bien sûr le travail. J'apprends donc à me servir d'Internet, à dessiner grâce aux premiers outils de dessin numérique, et je m'engage dans la construction de sites Internet. À New York d'abord, puis en France, puisque je rentre à Paris en 1998, avec un nouveau métier et de nouvelles expériences.

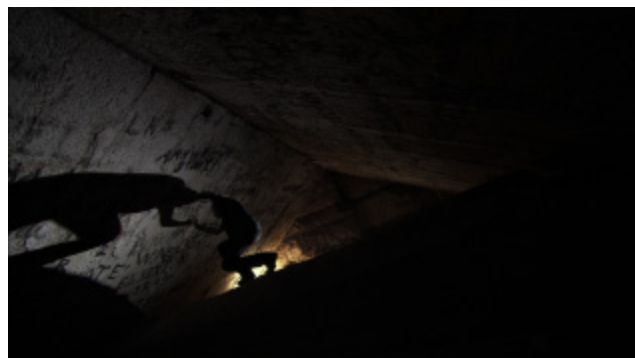
Une énigme,

l'intuition d'un homme et le début d'une quête
Le 2 janvier 1999, alors que je suis de nouveau à New York, mon père, ingénieur à la retraite, regarde une émission présentée par François de Closets, consacrée à la construction des pyramides. Il confronte les théories avancées à l'époque à son oeil d'expert ingénieur en construction. Elles ne résistent pas. Et il a ce déclic : les pyramides ont été construites de l'intérieur !

Une idée révolutionnaire,

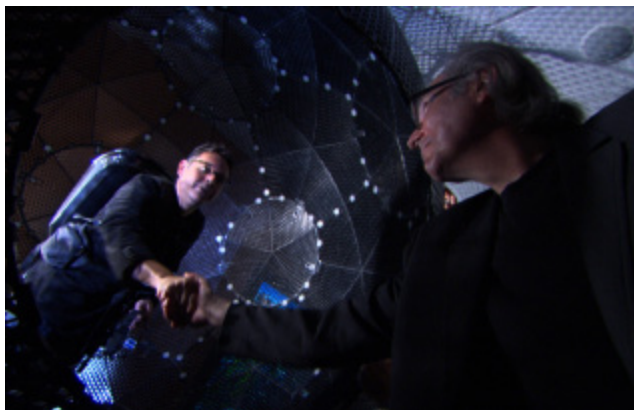
puisqu'elle balaie toutes les autres hypothèses avancées jusqu'alors. Il fait appel à moi, architecte, rôlé à la 3D pour l'épauler dans ses recherches. Dans le courant de l'année 2000, nous rencontrons des membres d'une équipe ayant effectué des sondages par microgravimétrie dans la pyramide de Kheops en 1986, sous l'égide de la Fondation EDF. Ils nous présentent des plans sur lesquels nous découvrons une anomalie dans la construction, un détail des esquisses qu'aucune des hypothèses ne peut expliquer. Cette anomalie, baptisée « construction en spirale », correspond parfaitement à l'allure d'une rampe construite à l'intérieur de la pyramide et qui aurait servi en partie à son édification !

C'est le début de mon aventure avec Kheops ...





Jean-Pierre Houdin et Dassault Systèmes



Histoire d'une rencontre,
un partenariat exemplaire.

Les réflexions d'un architecte solitaire

Jean-Pierre Houdin va pendant six ans élaborer sa théorie sur la base de l'intuition paternelle : et si la pyramide avait été construite de l'intérieur ?

Jean-Pierre est architecte, ce qui lui donne toute légitimité pour chercher à reconstituer le chantier de construction de Kheops. Après tout, qui pourrait mieux comprendre un architecte qu'un autre architecte ? Toutefois, il prend bien garde d'éviter un piège courant : architectes et ingénieurs se laissent en effet trop souvent obnubiler par leur savoir-faire technique. Ils proposent ainsi des théories astucieuses, mais entachées d'anachronismes et en contradiction avec les indices disponibles sur le terrain, ce que n'acceptent pas les égyptologues. Jean-Pierre évite soigneusement ces écueils (pas de roue ni de fer à l'époque de Kheops !). En outre, il adopte un point de vue résolument différent sur la pyramide en la considérant en 3 dimensions pour mieux la comprendre.

Mais il atteint vite les limites des outils dont il dispose. La rencontre avec Dassault Systèmes en 2005 va donner un nouveau souffle à sa quête.

La passion et l'innovation en commun

Pour ce féru de 3D, les solutions de Dassault Systèmes sont idéal. Conception 3D et simulations réalistes lui permettraient de poursuivre ses travaux alors que le modèle théorique et rationnel de sa théorie est déjà bien établi et les indices terrain répertoriés. Il se trouve que Dassault Systèmes a lancé il

y a peu un programme de mécénat technique au nom évocateur : « Passion for Innovation ». Destiné à soutenir des projets particulièrement novateurs portés par des individus ou des associations à but non lucratif, le programme semble fait pour Jean-Pierre. Lorsqu'il explique pour la première fois sa théorie en l'illustrant d'indices devant Mehdi Tayoubi et Richard Breitner, ceux-ci ne voient pas le temps passer, tant le discours est passionnant et la démonstration convaincante. Lorsque Jean-Pierre ajoute « Si je n'avais pas vu la pyramide en 3D, je n'aurais jamais pu la comprendre », ils échangent un coup d'œil significatif. Jean-Pierre Houdin intègre le programme peu après.

La théorie est déjà si bien structurée que les modélisations et simulations à réaliser pour la mettre à l'épreuve des solutions scientifiques de Dassault Systèmes en découlent tout naturellement.



Pendant près de deux ans,

une équipe pluridisciplinaire d'une quinzaine de personnes (ingénieurs, créatifs, développeurs) va accompagner l'architecte-chercheur. Dans un premier temps, il s'agit de modéliser la pyramide et de simuler les procédés de construction à l'aide des solutions scientifiques de Dassault Systèmes. Utilisées par les plus grands noms de l'industrie, ces solutions intègrent toutes les lois de la physique. Ainsi, une pyramide virtuelle se construit en mémoire des ordinateurs, avec toutes ses caractéristiques géométriques (forme, dimensions...) et physiques (densité des matériaux, élasticité, résistance...). Une sorte de « jumelle électronique » sur laquelle sont simulées de manière réaliste les étapes de la construction. L'avantage d'un modèle 3D de la réalité, c'est qu'on peut l'emporter partout sur un simple ordinateur portable, l'examiner sous tous les angles, prendre des mesures dans l'espace, rejouer les simulations en changeant à loisir les paramètres. Cela permet à Jean-Pierre d'aller encore plus loin dans sa réflexion et d'affiner, déjà, sa théorie. C'est toute la puissance de la 3D scientifique : simuler le réel, ajuster le modèle en conséquence et l'améliorer jusqu'à obtenir satisfaction, au simple coût du temps machine et d'un peu d'électricité.





Les simulations rendent leur verdict

la théorie de Jean-Pierre est mécaniquement plausible.

Pour la première fois, la construction de la Grande Pyramide est intégralement expliquée et chaque étape est validée par des logiciels scientifiques 3D habituellement utilisés par les plus grands industriels.

La 3D, langage universel au service du partage

Ce résultat, Dassault Systèmes et Jean-Pierre Houdin désirent le partager avec le plus large public possible.

La 3D se révèle à nouveau l'outil idéal.

Le 30 mars 2007, la Géode est ainsi transformée pour la première fois en machine à voyager dans le temps et dans l'espace. Transporté dans l'Egypte de Kheops, le public est immergé dans le chantier de la Grande Pyramide tel que le conçoit Jean-Pierre.

Après cette conférence,

la Géode met à son programme trois fois par semaine une visite 3D relief d'une heure du chantier de Kheops pour un public scolaire et familial, ainsi qu'une soirée exceptionnelle chaque mois avec Jean-Pierre en personne. Le retentissement est énorme. Tant le fond (la théorie) que la forme (une expérience immersive inédite) de l'événement sont abondamment repris et commentés dans la presse mondiale. Sur le fond, la théorie de Jean-Pierre Houdin est la première à expliquer entièrement la construction de la pyramide et à avoir été passée au crible d'outils scientifiques 3D. Les « mystères » de la construction sont rejetés dans les brumes du passé. On y découvre au contraire des Egyptiens procédant avec un grand pragmatisme, selon un plan soigneusement arrêté à l'avance : les premiers ingénieurs de l'histoire, en somme. Les indices sont clairement présentés par un Jean-Pierre observateur attentif au moindre détail qui passerait inaperçu pour un profane, mais révèle à l'architecte une

« intention constructive ». La manière de superposer les pierres, la moindre amorce de couloir, un changement d'angle inattendu : autant d'éléments alimentant la réflexion de celui dont la devise pourrait être « Ce n'est pas par hasard ». Le chantier de la pyramide selon Jean-Pierre Houdin est logique, d'une lumineuse simplicité, surtout lorsqu'il s'anime en 3D relief.

Car il y a la forme.

Deux ans et demi avant la déferlante « Avatar », les lunettes 3D font leur apparition dans une grande salle parisienne. Avec une différence de taille : il ne s'agit pas d'un film où le scénario est figé et la 3D calculée d'avance, mais d'une aventure interactive où l'univers 3D présenté est calculé en temps réel en fonction des mouvements effectués dans le monde virtuel. Aux côtés de Jean-Pierre, un « 3D-Jockey », ou « 3DJ » (il fallait bien inventer un terme, après le Disc-Jockey et le Video-Jockey !) promène les spectateurs sur le chantier de Kheops au gré des indications de l'architecte, qui lui demande de s'approcher de tel détail ou de pénétrer dans telle salle. Lors de l'une de ces soirées, Jean-Pierre est directement interpellé par une personne qui demande une précision. Aussitôt, le 3DJ se rapproche de l'endroit concerné, et Jean-Pierre donne des explications détaillées sur le point en question. Chaque spectateur devient ainsi acteur potentiel de sa propre expérience, et aucune séance ne ressemble tout à fait à la précédente. L'immersion 3D dans un monde d'une troublante réalité suscite une émotion puissante. Les repères habituels sont remplacés par ceux du monde virtuel qui en retire une force inédite et durablement marquante. Si l'on ajoute à cet impact incomparable la possibilité d'interaction avec le conférencier, on saisit tout le potentiel d'une telle expérience : éducation, divertissement, formation métier, entraînement ...

Une théorie vivante,

la naissance de l'archéologie assistée par ordinateur. Après la révélation initiale du 30 mars 2007, plus de 30000 personnes ont pu revivre le chantier de la pyramide à la Géode, et des millions d'internautes ont pu faire de même en ligne sur le site de Dassault Systèmes. Cette large visibilité débouche presque naturellement en 2008 sur la sortie du documentaire « Kheops Révélé », mêlant images extraites du monde virtuel 3D et séquences tournées en Egypte. Diffusé sur plus de 30 chaînes à travers le monde et récompensé par plusieurs prix, ce film retrace la quête de Jean-Pierre et le partenariat avec Dassault Systèmes, exemplaire tant sur le plan technique qu'humain. C'est au cours du tournage que va se produire un événement important. Parmi les indices répertoriés par Jean-Pierre à l'appui de sa théorie, il y a une encoche à environ 80m de haut sur l'arête Nord-Est de la pyramide, à l'endroit même où l'architecte situe l'un des « paliers » de sa rampe interne.





L'égyptologue Bob Brier

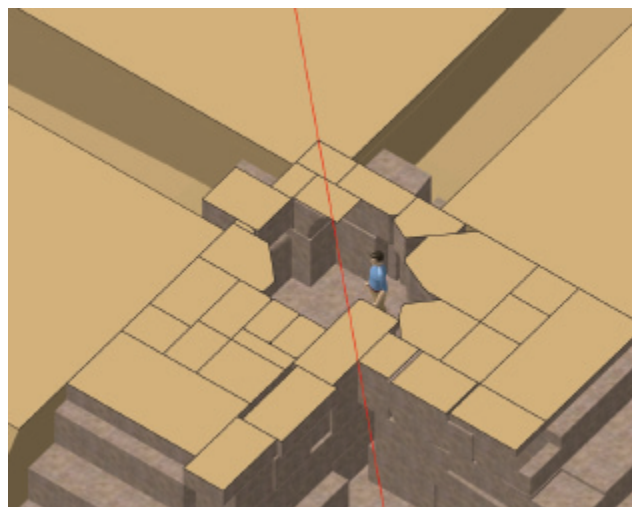
obtient l'autorisation d'escalader la pyramide et de visiter cette encoche. A la demande de Jean-Pierre, il en ramène photos, mesures et la séquence dûment filmée fait partie des bonus inclus dans le DVD du film.

Comment exploiter au mieux les données de cette visite exceptionnelle de quelques dizaines de minutes à peine ?

La réponse est évidente

et passe une nouvelle fois par les outils 3D. Guidées par Jean-Pierre Houdin en maître d'œuvre, les équipes de Dassault Systèmes modélisent la «Bob's Room» en 3D sur la base des photos et mesures (tenant même compte de la déformation des photos due à l'objectif grand-angle employé !). Ceci permet à Jean-Pierre d'émettre de nouvelles hypothèses, de les mettre à l'épreuve dans le monde virtuel 3D. Sans relâche, il corrige, affine le modèle et les simulations. Bientôt, grâce aux outils 3D, la rampe interne et le procédé de rotation des blocs dans les angles de celle-ci sont simplifiés, rationalisés.

En permettant d'exploiter en profondeur, a posteriori et à distance, les données d'une courte exploration, Jean-Pierre Houdin et Dassault Systèmes viennent de poser les jalons de «l'archéologie assistée par ordinateur».



Grâce à la 3D,

on peut désormais étudier et prolonger les résultats d'une mission d'observation et, pourquoi pas, préparer et simuler les suivantes, qui seront mieux ciblées et plus efficaces, donc moins longues et moins coûteuses. Mieux encore, la simulation réaliste permet de tester virtuellement des moyens d'investigations et de choisir les plus efficaces en vue de les mettre en œuvre sur le terrain. C'est ainsi que Jean-Pierre Houdin et les équipes de Dassault Systèmes ont pu vérifier que la thermographie infrarouge serait une technique efficace, discrète et surtout respectueuse du monument pour rechercher in situ la preuve expérimentale qui manque encore pour confirmer la validité de la théorie.

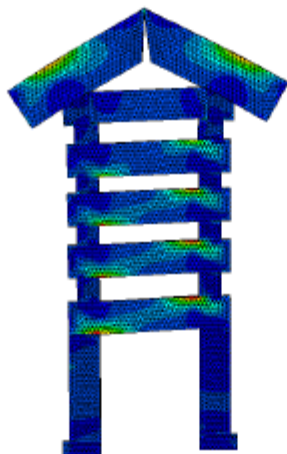
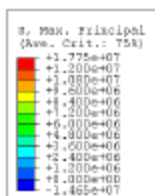
« Thermographie infrarouge et pyramide »

Voir plus loin section 10.





L'apport scientifique de la 3D à la théorie



La théorie de Jean-Pierre Houdin

est la première à expliquer l'ensemble des phases de la construction de la pyramide sans esquisser aucune difficulté, comme le problème de la construction du volume ou la mise en place de poutres de granit de plus de 60 tonnes au plafond de la Chambre du Roi entre 43 et 60m de hauteur. La méthode d'investigation fait appel au savoir-faire de l'architecte, à l'observation attentive du monument et du terrain (recherche d'indices révélant les intentions constructives), et à la documentation (afin d'écartier tout risque d'anachronisme). Cela rend le travail de Jean-Pierre tout à fait apte à la modélisation sur ordinateur.

Les lois physiques qui font qu'un mur tient debout ou non, n'ont en effet pas changé depuis l'Ancien Empire. Si les matériaux et les outils ont évolué, il n'en demeure pas moins vrai qu'un architecte contemporain est ainsi très bien placé pour analyser le travail de ses lointains prédécesseurs. Il l'est d'autant plus qu'il peut maintenant s'appuyer sur des outils logiciels puissants : les solutions 3D de Dassault Systèmes. Nous parlions de lois physiques. Elles se traduisent par des équations parfaitement intégrées à ces logiciels de conception et simulation. Le résultat ? Un monde virtuel se comportant en mémoire de l'ordinateur de la même manière que le monde réel. C'est précisément ce qu'on appelle la modélisation. Cette transposition numérique du réel s'effectue en trois étapes :

La modélisation géométrique /

La modélisation physique /

La modélisation fonctionnelle /

\ La modélisation géométrique

est l'étape préalable indispensable qui permet de dessiner l'objet étudié en trois dimensions et en grandeur nature. En l'occurrence, la pyramide a été recréée avec les cotes exactes disponibles et avec toute la distribution de couloirs intérieurs et de chambres funéraires. On peut ainsi manipuler le modèle géométrique à sa guise : le faire tourner pour l'examiner sous tous les angles, procéder à des coupes, examiner par transparence la distribution des couloirs internes et des chambres funéraires, etc. Évidemment impossibles à effectuer sur la vraie pyramide, les manipulations du modèle 3D permettent toutes sortes d'observations très rapides. Le modèle 3D a notamment permis à Jean-Pierre Houdin d'acquérir une meilleure connaissance du monument et d'établir des rapprochements entre certaines mesures (on peut en effet obtenir instantanément la distance entre deux points du modèle). Effectuer des recoupements entre certains dénivelés et la longueur de divers ouvrages internes de la pyramide fournit des pistes ou des confirmations à l'architecte dans l'élaboration de sa théorie. Toutefois, le modèle géométrique n'est encore qu'une « coquille vide » sans aucune information permettant de lui appliquer les lois de la physique pour simuler son comportement.

\ La modélisation physique

a pour objet d'enrichir la géométrie des caractéristiques physiques des matériaux constituant la pyramide. On peut facilement savoir où l'on y trouve du calcaire ou du granit, mais aussi connaître leurs paramètres physiques (densité, élasticité...) et intégrer ces données dans le modèle géométrique. Il devient alors possible de simuler le comportement de la pyramide virtuelle comme s'il s'agissait de la vraie : résistance des matériaux, effet du poids de la pyramide sur elle-même, etc.

\ La modélisation fonctionnelle,

La théorie de Jean-Pierre Houdin fait intervenir un certain nombre de systèmes mécaniques tels que des traîneaux ou un chariot circulant sur un train de rouleaux de bois. Ces systèmes sont bien connus en mécanique avec leurs caractéristiques et leurs différences (ainsi, les frottements ne sont pas les mêmes pour un patin qui glisse sur un rail ou une charge se déplaçant sur un rouleau). Ces caractéristiques sont intégrées dans le modèle 3D

On obtient ainsi un modèle complet possédant les dimensions, les paramètres physiques et fonctionnels de la véritable pyramide.

Le résultat

Une « jumelle électronique » de la véritable pyramide sur laquelle on peut effectuer toutes les manipulations et toutes les simulations possibles et ce n'importe où,





n'importe quand, sur un simple PC portable. Seule la modélisation 3D offre une telle souplesse et une telle commodité pour tester rapidement de multiples hypothèses. En mettant l'ensemble de ses solutions à la disposition de Jean-Pierre Houdin, Dassault Systèmes lui a offert une Egypte virtuelle réaliste dans laquelle il a pu à loisirs mettre sa théorie à l'épreuve des lois physiques.

Depuis 2007,

le même modèle réaliste 3D lui a permis d'affiner la théorie au gré des informations collectées sur le terrain et de l'évolution de ses réflexions. C'est l'incontournable apport de la 3D scientifique au projet. Habituellement, les solutions de Dassault Systèmes permettent aux industriels d'inventer le futur. Conception et simulation du produit, conception et optimisation des chaînes de production (de la tâche élémentaire jusqu'à l'usine complète), partage d'informations entre partenaires et sous-traitants en temps réel, tout est mis au point en 3D dans l'univers virtuel de l'informatique, où les erreurs sont infiniment moins coûteuses que dans la réalité. Le niveau de détail va jusqu'à vérifier l'ergonomie des postes de travail grâce à des mannequins virtuels ! Cette véritable « antichambre du réel » permet donc les innovations les plus audacieuses, à moindre coût, en toute sécurité et beaucoup plus rapidement. C'est ainsi que, par exemple, les gammes se renouvellent bien plus vite que par le passé avec des produits toujours plus performants et ce, dans toutes les industries : biens de consommation, automobile, aviation ... Dans le cas de Jean-Pierre, les outils scientifiques 3D de Dassault Systèmes ont permis le décryptage a posteriori du chantier de Kheops.

Toute démarche scientifique comporte trois étapes dans un ordre immuable :

L'intuition qui mène à la théorie /
« La pyramide a été construite de l'intérieur »

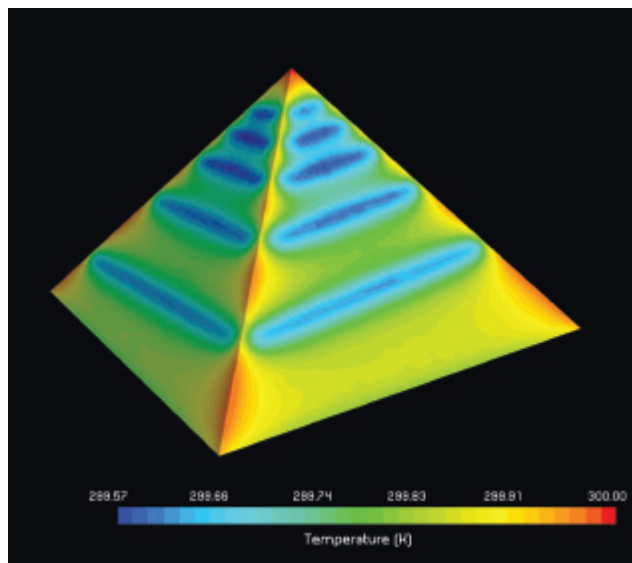
La démonstration rigoureuse de la théorie /

La preuve expérimentale /

La modélisation et la simulation 3D ayant apporté la démonstration de la validité mécanique de la théorie, il serait souhaitable d'aller sur le terrain pour vérifier expérimentalement la présence de la rampe interne. Il faut tout d'abord pour cela sélectionner une méthode d'investigation à la fois efficace et respectueuse du monument, de son environnement et des contraintes touristiques du plateau de Gizeh. À ce stade, le modèle 3D s'est encore révélé utile. Une simulation thermique a indiqué la piste prometteuse de la thermographie infrarouge

« Thermographie infrarouge et pyramide »

Voir plus loin section 10.



De même, c'est la souplesse des outils de Dassault Systèmes qui a permis à Jean-Pierre Houdin d'affiner sa théorie depuis 2007 en intégrant des données telles que la « Bob's Room ». Tout changement, que ce soit à la géométrie du modèle ou aux données qui lui sont rattachées, provoque automatiquement l'analyse des impacts sur le modèle global et la propagation automatique des modifications au sein de celui-ci.

En clair,

inutile de repartir à zéro comme on le faisait au temps de la planche à dessin. Bien loin de prétendre se substituer aux observations effectuées sur le terrain, le modèle 3D et la simulation de son comportement permettent non seulement de nourrir la réflexion de Jean-Pierre et faire vivre la théorie, mais aussi de mieux préparer les futures missions d'observation. La 3D scientifique s'impose ainsi comme un outil incontournable dans l'archéologie moderne.

L'Université de Leeds

l'a bien compris. Pour mener à bien une mission d'exploration robotique des couloirs de la chambre de la Reine dans la Grande Pyramide, l'Université est entrée dans le programme « Passion for Innovation » en 2009. Le robot Djedi a ainsi été conçu à l'aide des solutions SolidWorks de Dassault Systèmes et son parcours simulé dans les couloirs reconstitués en 3D.

Une parfaite illustration des possibilités offertes par la 3D en matière d'investigations archéologiques.





La Révolution 3D interactive pour tous



La présentation initiale de la théorie en 3D immersive à la Géode a montré la pertinence d'une autre 3D, la 3D média interactif.

Si la 3D scientifique a été un préalable indispensable pour étayer solidement la théorie, l'impact sensoriel et émotionnel de la 3D média, son universalité ont montré sa pertinence pour le partage efficace et attractif de l'information. La force incomparable de l'expérience directe, trois ans avant l'arrivée du cinéma 3D Grand Public, a démontré la puissance des solutions 3DVIA de Dassault Systèmes dans le domaine du « serious game ».

The Museum of Fine Arts (MFA) de Boston et l'Université de Harvard ne s'y sont d'ailleurs pas trompés. Suite à un partenariat stratégique signé en 2010, Dassault Systèmes et le MFA ont décidé de modéliser le plateau de Gizeh en 3D afin d'exploiter l'immense fonds Reisner détenu par le MFA. A l'issue de ce projet d'envergure, tout un chacun pourra naviguer en 3D et en ligne à sa guise dans toute la nécropole du plateau, visiter les mastabas soigneusement reconstitués et recueillir toutes les informations sur les occupants de la sépulture, mais aussi sur sa date de découverte, les objets recueillis, etc.

Le plateau de Gizeh virtuel

s'adressera tant au grand public, avec une visite guidée des plus beaux mastabas, qu'aux étudiants et aux professionnels. Ils pourront accéder spécifiquement au niveau d'information adapté. On le voit, une nouvelle muséographie se dessine aussi grâce à la 3D interactive, une muséographie moderne, adaptée aux exigences d'un public maintenant nourri de multimédia, et qui ne saurait plus se satisfaire d'objets exposés dans des vitrines, accompagnés de quelques textes explicatifs.

La 3D interactive permet au contraire de les restituer dans leur contexte et de leur redonner vie, dans un parfait équilibre entre rigueur scientifique et créativité technologique. Une expérience dont peuvent aussi profiter chercheurs et étudiants.

La dimension pédagogique

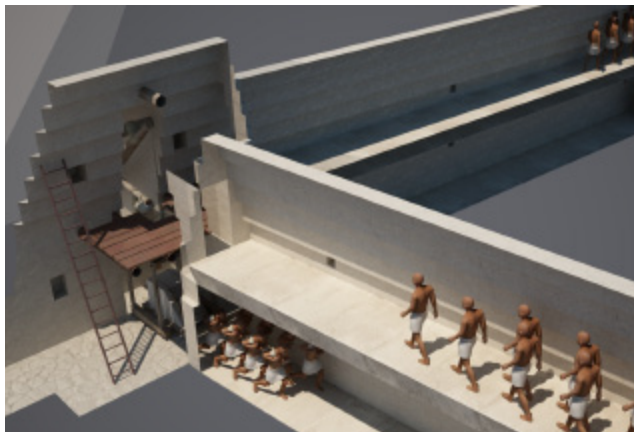
Du reste, Peter Der Manuelian, détenteur de la chaire d'égyptologie Philip J. King à Harvard, en est convaincu. Superviseur enthousiaste du projet Gizeh 3D avec Dassault Systèmes, il a récemment donné à l'Université le premier cours d'égyptologie en immersion 3D dans la nécropole virtuelle du plateau de Gizeh ! De nouvelles formes d'interactions immersives dans le domaine de l'archéologie émergent. L'utilisation de la technologie 3D y suscite clairement de nouvelles formes de communication et d'investigations scientifiques.

Enfin, et la démonstration en a été faite dès 2007 avec la théorie de Jean-Pierre, la force des univers 3D proposés grâce aux solutions 3DVIA de Dassault Systèmes est d'être multi-plateformes. Moyennant quelques adaptations d'interface utilisateur et de textures, un même contenu 3D peut ainsi être indifféremment proposé dans des salles 3D relief type Géode, en ligne sur le web, sur des TV 3D, des consoles de jeu, etc., l'essentiel de la 3D et de la logique qui l'anime restant identiques, ce qui optimise considérablement les coûts de production. La 3D interactive pour tous est maintenant une réalité !





Kheops Renaissance, la théorie affinée



A la base des travaux de Jean-Pierre Houdin,

la grande nouveauté, le parti pris architectural au cœur de tout le chantier : construire de l'intérieur. Il y a ensuite la « méthode Houdin » : **poser correctement le problème.**

L'architecte résume la construction de la Grande Pyramide en trois points :

1/ Construire le volume.

2/ Atteindre le sommet.

3/ Construire au cœur du monument la Chambre du Roi avec un plafond plat (la grande nouveauté de la pyramide de Kheops, une prouesse unique que ni Khephren ni Mykerinos ne reconduiront dans leurs pyramides).

L'immense mérite de cette approche ?

Traiter chacun de ces trois points avec la meilleure réponse technique possible en fonction des contraintes de chaque étape. C'est la fin de la « pensée unique » partant du principe que la pyramide avait été construite de l'extérieur. Les théories « classiques » étaient en outre monolithiques, ne proposant qu'un seul procédé qui pouvait convenir à une étape, mais en aucun cas à l'ensemble de la construction. Il fallait segmenter celle-ci et oser adopter un autre point de vue.

Ainsi

1. La majeure partie du volume (85%) est construite à l'aide d'une courte rampe extérieure qui permet un approvisionnement massif et rapide du chantier en matériaux. Elle n'est plus pertinente au-delà du tiers de la hauteur, sous peine de prendre des proportions déraisonnables.

2. C'est pourquoi la suite de la construction fait appel à une rampe intérieure en spirale qui court « sous la peau » de la pyramide. Construite dès la base de la pyramide, elle permet d'approvisionner le chantier jusqu'au sommet.

3. Le choix d'un plafond plat pour la Chambre du Roi impose l'utilisation de granit, seul matériau capable de couvrir la pièce. La plus lourde poutre pèse ainsi 63 tonnes ! La seule force humaine est insuffisante pour déplacer et mettre en place de telles masses. Il fallait l'assistance d'un système de traction : un contrepoids circulant dans la Grande Galerie.

La rampe extérieure en détails

La rampe extérieure de Jean-Pierre n'a rien à voir avec les immenses rampes de plus d'un kilomètre et demi suggérées par certains. Profitant astucieusement d'un promontoire naturel du plateau, la rampe part plus haut que le niveau de base de la pyramide, ce qui lui permet, avec une longueur de 325m seulement, d'atteindre la face sud de la pyramide à 43m de haut (base de la Chambre du Roi). Elle se poursuit alors par une tranchée à l'intérieur du monument jusqu'à une hauteur de 70m (nouveauté par rapport à 2007), le tout avec une pente douce d'à peine plus de 8,5%. Elle se prête donc bien à sa fonction : l'approvisionnement massif du chantier en matériaux, le plus longtemps possible. A 70m de hauteur, il ne reste que 15% du volume à construire, ce qui semble peu. Cependant, la tâche est plus ardue qu'il n'y paraît. Cette partie de la pyramide s'étage en effet sur 76m de haut, hors de portée de la rampe extérieure, à moins de la rallonger démesurément et de lui faire dépasser le volume de la pyramide elle-même ...

La rampe intérieure en détails

Le rôle de la rampe intérieure est de permettre d'atteindre le sommet de la pyramide. Construite dès le début du chantier, c'est une rampe droite à quart tournant d'une pente douce de 7% employée pour amener les blocs de façade en calcaire de Tourah. Lorsque la rampe extérieure a rempli son office, elle est démontée, et les blocs de calcaire qui la composent sont retailés pour fournir les petits blocs qui vont permettre de terminer les quinze derniers pour cent (en volume) du monument. Ces blocs reconditionnés sont ensuite hissés par la rampe intérieure. Le principe de la rampe intérieure et de la rotation des blocs dans les angles de cette rampe n'a pas changé. En revanche, suite aux nouveaux travaux de Jean-Pierre résultant notamment de la modélisation 3D de la « Bob's Room », le tout a été considérablement simplifié et épuré.

Il n'y a plus de courbure extérieure pour la circulation des ouvriers. La rampe possède désormais deux niveaux : en bas pour la circulation des traîneaux chargés de blocs de calcaire et en haut pour le retour des équipes « à vide ».





Une telle configuration est visible dans la pyramide de Meïdoun (couverture du couloir descendant par une voûte en encorbellement formant un second niveau). La rotation des blocs dans les angles se fait dans des « Bob's Room » avec un système de potence de bois analogue au chadouf servant à puiser l'eau du Nil. Il n'y a plus de plate-forme à ciel ouvert comme en 2007.

La pyramide est donc entièrement construite de l'intérieur en commençant par les faces, assise après assise, jusqu'à son sommet. Ces faces de la pyramide, d'une surface totale de plus de 84.000m², sont définitivement réalisées au fur et à mesure de la construction, sans aucuns travaux de finition supplémentaires. Une simplification remarquable et un gain de temps de plusieurs années pour le chantier lui-même.

La rampe et le contrepoids

du plateau de Gizeh exploitant jusqu'au bout le principe de la rampe extérieure comme « voie rapide » pour les pierres et du contrepoids en tant que « moteur », Jean-Pierre Houdin installe sur le plateau de Gizeh une rampe directe depuis le port jusqu'au pied de la rampe extérieure de la pyramide. Cette « rampe du plateau » simplifie et accélère l'approvisionnement en matériaux du chantier, particulièrement les lourds monolithes, d'autant que la force motrice pour le déplacement de ceux-ci est fournie par un système à contrepoids analogue à celui suggéré par Jean-Pierre en 2007 dans la Grande Galerie. Ce nouveau contrepoids circule dans une tranchée creusée directement dans le socle rocheux (plus tard, celle-ci aura d'ailleurs une grande influence sur l'architecture de la pyramide de Khephren et sa présence est vérifiable sur place). La rampe du plateau aurait par la suite servi de soubassement à l'allée monumentale de Khephren. De fait, on constate sur place la présence d'un soubassement de 23m de large (pour une allée monumentale large de 10m seulement) qui n'a d'équivalent sous aucune autre chaussée monumentale de pyramide. Cette rampe dessert au long de son parcours plusieurs carrières sur le plateau qui ont fourni la majeure partie des matériaux de la pyramide. Une fois ces matériaux transportés au chantier, le contrepoids de la rampe du plateau est démonté et ses éléments réutilisés sur le chantier.

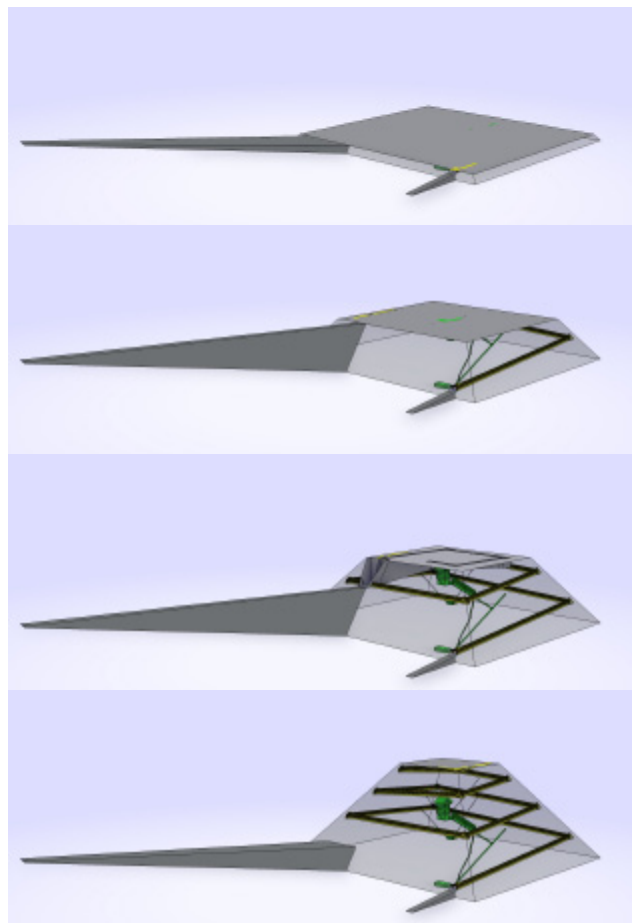
Le contrepoids de la Grande Galerie

La mise en place de poutres de granit pesant entre 27 et 63 tonnes dans la Chambre du Roi ne peut se faire avec la seule force humaine. Environ 600 personnes seraient nécessaires pour hisser les plus lourds monolithes. Il serait impossible de les coordonner et, de plus, la place manque pour les accueillir. Un contrepoids circule donc dans la Grande Galerie pour réduire le nombre d'hommes nécessaires à environ 180. Selon le principe de l'ascenseur (ou du funiculaire), lorsque le contrepoids descend

dans la Grande Galerie, la plateforme supportant la poutre à mouvoir monte. Cette « assistance » permet de hisser et de mettre en place plus de 70 poutres. Par rapport à la version initiale de la théorie en 2007, et lors de la mise en place des plafonds, il n'y a plus d'équipe affectée au réarmement du contrepoids après une traction. En effet, l'ensemble de l'équipement de la plateforme de transport des poutres est constitué de tous les éléments du contrepoids ayant circulé dans la tranchée dans l'axe de la rampe du plateau et récupérés à cet effet. A chaque fois qu'une poutre est déchargée à son niveau de mise en place, cette plateforme reprend du service en tant que contrepoids ; elle est chargée d'une quinzaine de petits blocs de près de 3 tonnes, facilement transportables, soit suffisamment pour devenir un « contrepoids au contrepoids » et réarmer le système de la Grande Galerie.

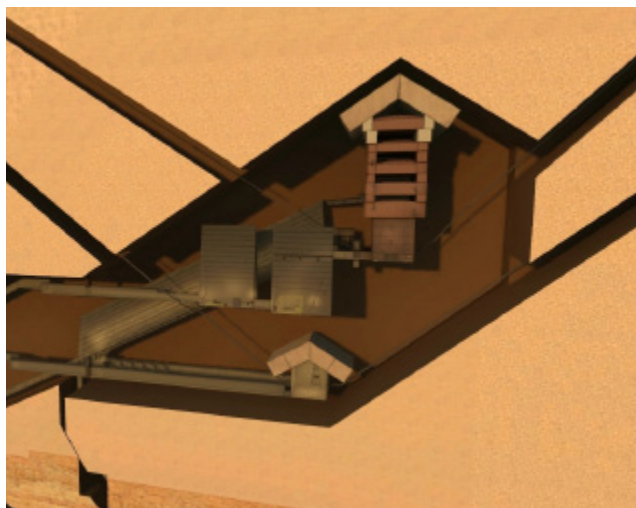
Toutes les évolutions de la théorie depuis sa présentation initiale en 2007 ne remettent aucunement en cause les principes de base. Elles les exploitent au contraire plus avant, allant dans le sens d'une simplification et d'une plus grande économie de moyens, notamment humains. A noter que Jean-Pierre Houdin a toujours trouvé des indices sur le terrain à l'appui de ses réflexions (voir plus loin « Les indices »).

Voir livret « Les indices »





Des antichambres dans la pyramide de Kheops



La lignée architecturale

Jean-Pierre Houdin ne considère pas la pyramide de Kheops comme un monument isolé, mais la replace dans la lignée architecturale des pyramides de la IV^e Dynastie. Depuis la première pyramide à degrés de Djoser créée par le génial Imhotep, Jean-Pierre voit une logique menant aux pyramides suivantes, dont celle de Kheops. Pour l'architecte, chaque concepteur de pyramide reprenait les innovations mises en œuvre dans la précédente et en ajoutait d'autres pour aller plus loin. On passe ainsi de la pyramide à degrés à la pyramide lisse, tandis que les chambres funéraires, d'abord creusées dans le sol, montent dans l'édifice progressivement jusqu'à celle de Kheops avec sa formidable chambre à plafond plat située au cœur du monument. Un processus d'évolution logique et parfaitement maîtrisé par les bâtisseurs égyptiens que Jean-Pierre considère comme les premiers ingénieurs de l'histoire. A cet égard, un certain nombre d'éléments intriguaient Jean-Pierre. Il y avait tout d'abord le curieux décalage des couloirs de la pyramide de Kheops et de la Grande Galerie par rapport à l'axe Nord-Sud.

Pourquoi un tel décalage ?

Selon Jean-Pierre, les architectes égyptiens ne faisaient jamais rien au hasard. Il en est de même pour la forme curieusement complexe des conduits de la Chambre du Roi et de la Chambre de la Reine. Rien ne cadre avec le pragmatisme dont semblent faire preuve les bâtisseurs de l'Ancien Empire. Il y avait aussi ce bloc de granit présent dans la Chambre du Roi depuis la visite du Calife Al-Mamoun, et ce jusqu'en 1998, date à laquelle il a été évacué au cours de travaux de rénovation. Il est impossible que la Chambre du Roi ait été bouchée de

l'extérieur grâce à ce bloc. Compte tenu de ses dimensions, ce bloc ne pouvait être poussé que de l'intérieur. Quelle sortie auraient donc emprunté les ouvriers qui ont effectué cette opération ? Il y a également la disproportion entre la taille des chevrons surplombant l'entrée sur la façade de la pyramide et celle de l'entrée elle-même. Et puis surtout, il y a la pyramide Rouge, la dernière pyramide de Snefrou, le père de Kheops qui s'en fit construire au moins trois. La Rouge possède un plan d'une grande pureté. La chambre funéraire est dans l'édifice, précédée de deux antichambres. Le couloir d'accès, les antichambres et la chambre sont parfaitement dans l'axe du monument. Les antichambres servaient à entreposer le mobilier funéraire laissé au défunt. Ce plan très pur, ces antichambres, posent à Jean-Pierre la question de l'héritage de Kheops. Pas d'antichambres dans sa pyramide, des couloirs étrangement décalés... Pourquoi cette apparente incohérence dans le plan de Kheops ? Pourquoi la technique des antichambres à voûte en encorbellement, parfaitement maîtrisée depuis longtemps, n'a-t-elle pas été reconduite ? Kheops n'aurait-il pas eu de mobilier funéraire ? Difficile à croire pour un roi qui nous a laissé le plus imposant monument qui soit ! Après les mystères de la construction, voici le mystère de l'héritage.

Et c'est l'intuition.

Jean-Pierre superpose le plan des deux pyramides. Il remonte le couloir de la Rouge et les antichambres de manière à ce que celles-ci deviennent celles de la chambre de Kheops. La superposition est parfaite. Mieux, elle explique maintenant le fameux décalage des couloirs descendant et ascendant et de la Grande Galerie. Le couloir d'accès aux antichambres et ces dernières qui se trouvent dans l'axe nord-sud. De même, la forme étrange des conduits des chambres funéraires leur permet d'éviter le nouvel ensemble ! Les actuels couloirs descendant et ascendant et la Grande Galerie étaient considérés comme le circuit par lequel Kheops avait été inhumé dans sa pyramide. Jean-Pierre a toujours remis en cause le caractère funéraire de la Grande Galerie. Pour lui, il ne s'agit que d'une glissière destinée à accueillir le système à contrepoids. Par ailleurs, emprunter ce passage pose un problème insoluble pour refermer la Chambre du Roi. En effet, le fameux bloc de granit enlevé par Al-Mamoun ne peut être remis en place, on l'a vu, que de l'intérieur. Alors ? Emmurait-on vivants quelques malheureux ouvriers avec le roi ? Il paraît impensable que Kheops partage sa chambre funéraire avec quiconque !

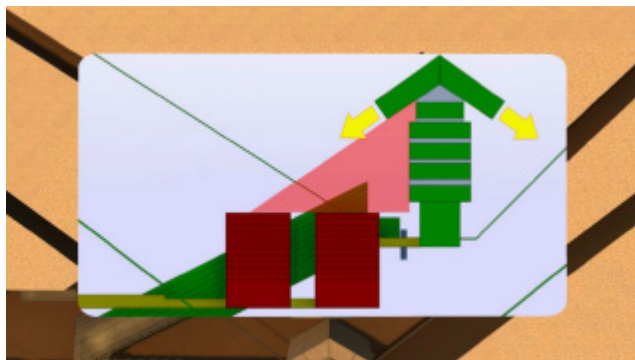
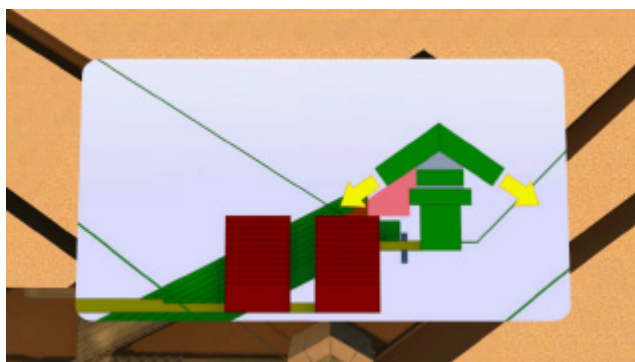
Le véritable itinéraire de Kheops

vers sa demeure d'éternité passerait donc par le nouveau couloir, les antichambres et enfin la Chambre du Roi. Le début du nouveau parcours est situé directement au-dessus l'entrée du couloir descendant, dans deux pièces successives logées sous les chevrons de la façade. L'entrée actuelle, que tout le monde emprunte

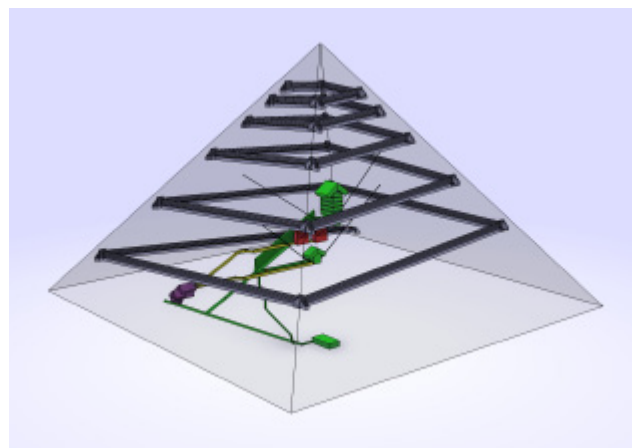




aujourd'hui pour visiter la pyramide, est plus à l'ouest et a été percée par le Calife Al-Mamoun en l'an 820 lorsqu'il s'est lancé à la recherche du trésor de Kheops. Quant aux antichambres, elles débouchent dans la Chambre du Roi par un court couloir horizontal aboutissant derrière un bloc de granit du mur nord de celle-ci, sous un linteau astucieusement dissimulé dans la maçonnerie. Dès lors, le plan de la pyramide s'éclaire sous un jour nouveau. D'une part une filiation architecturale cohérente entre la Rouge et Kheops est rétablie ; d'autre part l'étrange décalage de la distribution des couloirs connus jusqu'ici s'explique.



de nombreuses étrangetés dans le plan de la pyramide. Il rend enfin, au roi Kheops, des antichambres pour son mobilier funéraire, chose tout à fait logique et bien loin des fantasmes des chasseurs de trésor. Et si la preuve expérimentale n'a pas encore été apportée, les indices sont pourtant nombreux.



[voir « Les indices »](#)

Chambres de décharge

Au-dessus de la Chambre du Roi, leur fonction serait, pour une raison technique, de reporter bien plus haut dans la masse du monument les chevrons de calcaire qui couronnent l'ensemble. Sans cette structure, les antichambres auraient été écrasées par la charge oblique transférée du versant nord du toit en chevrons, leur couverture en encorbellement ne pouvant résister qu'à une charge verticale. Ce type de structure ne se trouve que dans la Grande Pyramide et est liée au choix des concepteurs de couvrir la Chambre du Roi d'un plafond plat. Ce dernier nécessitant de toute façon un contrepoids pour sa mise en place, la pose des autres plafonds n'était plus qu'une question de coût et de temps, ce que les architectes ont délibérément accepté. L'idée d'une chambre secrète dans laquelle reposerait toujours Kheops ou son trésor n'est pas nouvelle. Elle n'a toutefois jamais pu être rationnellement ou expérimentalement étayée. Le nouveau plan de la pyramide proposé par Jean-Pierre a le mérite de se baser sur l'histoire, de suivre un raisonnement cohérent, d'être géométriquement correct et d'expliquer





La recherche d'une preuve sur le terrain



UNIVERSITÉ
LAVAL

Université Laval (Québec)-Dassault Systèmes

Thermographie infrarouge et pyramide

Depuis la première révélation en 3D immersive, le 30 mars 2007, de la théorie de Jean-Pierre Houdin, un large public s'est passionné pour la quête de cet architecte-chercheur. Parmi les questions qui revenaient le plus souvent lors des présentations à la Géode, celle de la validation par une mission en Egypte fut sans doute la plus récurrente.

Véritable symbole national sur les rives du Nil, la Grande Pyramide ne se livre pas si facilement. On comprend aisément que les autorités égyptiennes se montrent pointilleuses sur les demandes de mission à son sujet. En accord avec son respect absolu du monument et de ceux qui l'ont conçu et construit, Jean-Pierre Houdin n'a jamais envisagé d'autre méthode d'exploration que l'emploi de techniques non-destructives. Pas question de faire des trous dans la pyramide ! De même, par respect des enjeux économiques touristiques, Jean-Pierre souhaite privilégier des moyens aussi peu intrusifs que possible. Hors de question également d'envisager des technologies qui empêcheraient l'accès à la pyramide pendant la mission. Les progrès récents dans la miniaturisation des caméras pourraient bien faire de la thermographie infrarouge la technique de choix pour une mission discrète et totalement « indolore » pour la vérification de la présence supposée d'une rampe interne dans la dernière demeure de Kheops.

Dès 2008,

Dassault Systèmes effectue des simulations thermiques sur un modèle de pyramide pleine (sans rampe) et un modèle de pyramide avec la rampe interne pour vérifier que la thermographie infrarouge pourrait valider expérimentalement la théorie de Jean-Pierre. Effectivement, la simulation révèle que l'air emprisonné dans la rampe interne provoque une inversion de la température au sommet du monument : l'été et de jour, par exemple, la pyramide serait plus froide au sommet alors qu'une pyramide pleine verrait son sommet plus chaud. La simulation montre enfin que la rampe interne laisse une empreinte

thermique à la surface de la pyramide. Les différences sont faibles, mais suffisamment encourageantes pour que l'équipe envisage de creuser la question.

Fin 2010,

Jean-Pierre Houdin rencontre l'équipe de la chaire MIVIM (Multipolar Infrared Vision Infrarouge Multipolaire) de l'Université Laval au Québec, un laboratoire reconnu pour ses travaux de recherche et ses traitements avancés en thermographie infrarouge. Séduits par la théorie et le travail déjà effectué par Jean-Pierre et Dassault Systèmes, les membres de la chaire MIVIM sont à leur tour frappés par le « virus Kheops » et décident de rejoindre l'aventure au travers du programme « Passion for Innovation » de Dassault Systèmes.



Xavier Maldague - Université de Laval

On ne pouvait rêver mieux. Le haut niveau scientifique et l'expérience des membres de l'Université Laval en la matière en font des partenaires de choix. Rapidement, ils proposent une méthode expérimentale qui sera l'axe central d'un dossier de demande de mission auprès des autorités égyptiennes, avec le concours de Dassault Systèmes qui mettra à leur disposition le modèle des simulations thermiques réalisées en 2008 et des moyens de simulations et calcul.

Pourquoi la thermographie infrarouge ?

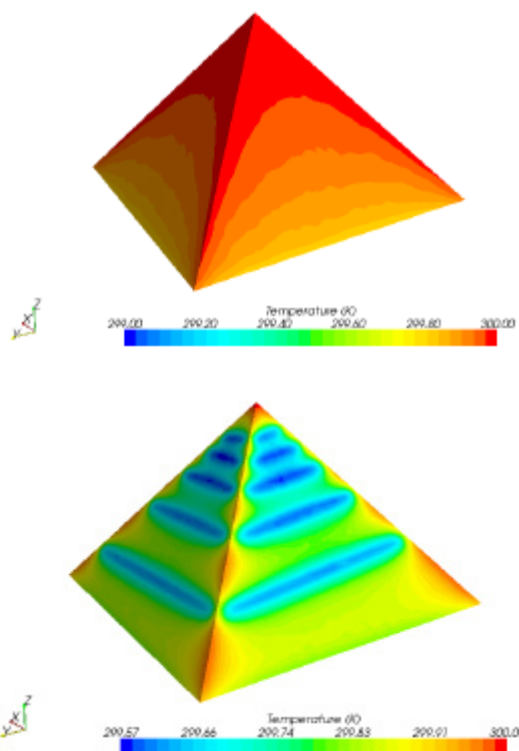
Les rayons infrarouges sont des ondes, tout comme la lumière visible, mais de fréquences bien plus faibles. Tout objet ayant une température non nulle émet une certaine quantité de ce rayonnement électromagnétique



infrarouge, proportionnellement à sa température.

La lumière visible révèle la forme extérieure des objets par réflexion et leur couleur par absorption d'une partie du rayonnement par le matériau dont est constitué l'objet.

Les rayons infrarouges, au contraire, peuvent révéler la structure profonde des objets par leur émission de chaleur. En fonction du matériau et des anomalies sous-surface telles que fissures et cavités, la chaleur renvoyée à la surface est différente, permettant ainsi d'obtenir une image de la structure interne. C'est la thermographie infrarouge, et il est clair qu'elle permettrait de mettre en évidence la rampe interne de Jean-Pierre Houdin.



La méthode

Les cycles de variations de température extérieure d'une saison à l'autre influencent l'évolution de la température de la surface de la pyramide dans le temps. De manière assez évidente, l'évolution de la température de surface de la pyramide, que l'on appelle dans le jargon la «réponse thermique», suit donc presque la même évolution de température que celle des saisons. Mais il y a une nuance: l'évolution de la température à la surface de la pyramide va en réalité dépendre très légèrement de ce qui se trouve sous sa surface, et en particulier s'il y a un vide sous la surface, comme par exemple une hypothétique rampe. C'est ainsi l'observation non pas des températures de surface directement, mais plutôt l'observation de la différence d'évolution des températures d'un point à l'autre à la surface de la pyramide qui pourra donner une indication quant à la présence ou non de rampe interne. La mesure de température pour le suivi de l'évolution de la réponse thermique est effectuée par caméra

infrarouge, qui présente l'avantage de pouvoir mesurer la température de surface de la pyramide en tout point, d'un seul coup, à distance sans le moindre contact, à plus de 300 mètres. Conséquences ? Aucun dommage, aucun trou, pas le moindre grain de sable déplacé : la méthode est non intrusive, totalement invisible du public et des touristes. Sans besoin même de présence d'opérateurs sur place. Les données sont recueillies à distance par internet et les traitements réalisés directement au Canada dans le laboratoire MIVIM du Laboratoire de Vision et Système Numérique de l'Université Laval, avec l'aide de Dassault Systèmes.

Cette technique en apparence simple, mais en apparence seulement, est connue sous l'appellation barbare 'd'évaluation non destructive des matériaux ou NDT par thermographie active modulée ou lock-in'. «Le principe de base est lié au subtil décalage entre les variations du chauffage solaire et la réponse thermique de la pyramide à celui-ci, ce décalage étant fonction de la construction du monument» explique Xavier Maldague, directeur de la chaire canadienne MIVIM de recherche en vision infrarouge. La méthode est appliquée par exemple dans l'évaluation des matériaux composites en aéronautique comme les ailes d'avion. La différence est qu'elle est utilisée ici à une échelle infiniment plus grande, comme cela n'a encore jamais été fait dans le passé. À une telle échelle, il faut plus de temps, et une ou deux années entières de mesures 24h/24h ne seront pas de trop pour observer les très lentes évolutions de températures dans le temps au travers des 3 à 6 mètres d'épaisseur de mur qui couvriraient les rampes ; mais depuis 4500 ans, les pyramides nous ont de toute façon appris à être patients.



Matthieu Klein - Université de Laval



Dassault Systèmes sur le plateau de Gizeh



Avec la présentation initiale du projet Kheops en 2007, de prestigieuses institutions ont découvert la puissance des solutions 3D de Dassault Systèmes et leur intérêt pour l'archéologie. Dassault Systèmes est ainsi présent sur le plateau de Gizeh via deux nouveaux projets d'envergure.

Djedi :

Un robot à la découverte des conduits de Kheops, une mission Leeds University - Dassault Systèmes

Les égyptologues

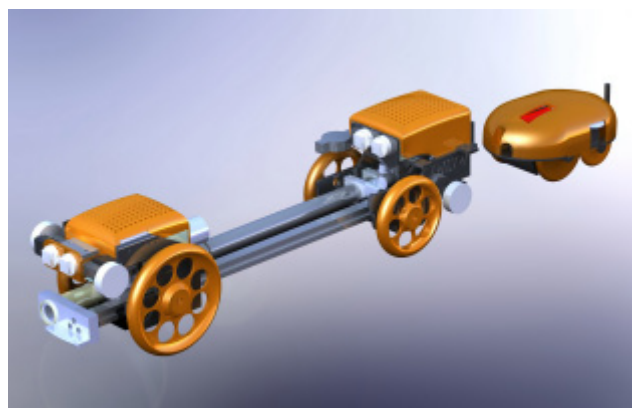
ont toujours été intrigués par deux paires de couloirs étroits partant de la chambre du Roi et de la Chambre de la Reine. Pourquoi ont-ils été construits ? Où mènent-ils ? Si ceux de la Chambre du Roi avaient vraisemblablement un rôle de conduits d'aération, on ne peut en dire autant de ceux de la Chambre de la Reine, ne serait-ce que parce que leur éventuel débouché en façade n'a jamais été localisé. De plus, leur géométrie intrigue : le conduit Sud est droit, alors que celui du Nord est coudé. L'exploration des conduits de la Chambre de la Reine semblait donc inévitable. Toutefois, étant donné leur exiguïté, l'emploi de petits robots s'est rapidement imposé comme une bonne solution.

C'est ainsi qu'en 1993,

l'ingénieur Rudolph Gantenbrink et son équipe mettent au point Upuaut et Upuaut2 (le nom signifie « celui qui ouvre le chemin » dans l'antique langue égyptienne). Equipés de caméras et d'instruments de mesure, les robots butèrent sur une dalle munie de pièces rapportées en cuivre qui obstruaient le couloir nord comme le couloir sud.

En 2002,

le flambeau est repris par Pyramid Rover, un robot financé par la National Geographic Society qui va reprendre l'exploration sous l'égide du Conseil Suprême des Antiquités Égyptiennes dirigé par le docteur Zahi Hawass. L'exploration du conduit sud confirma celle de Upuaut. Quant au conduit nord, un orifice percé dans la dalle découverte en 1994 permit, au moyen d'une caméra, de localiser un second bloc barrant à nouveau le passage ! Le Conseil Suprême des Antiquités décida alors de poursuivre l'exploration avec une nouvelle équipe internationale et pluridisciplinaire. Issue de l'Université de Leeds, elle fait en effet appel à des spécialistes en robotique comme Shaun Whitehead (impliqué dans le robot Mars Rover), ainsi qu'à des spécialistes des capteurs et caméras embarqués venant du Canada et de Hong-Kong. La mission fut baptisée Djedi, du nom du mage que Kheops consulta, dit-on, pour décider de l'emplacement de sa pyramide.



Le principal défi

consiste à parcourir entièrement le conduit nord qui, outre une forte pente de 50 degrés, présente un coude difficile à franchir. L'Université de Leeds décida alors de faire appel aux solutions de conception et simulation 3D de Dassault Systèmes. C'est ainsi que le projet Djedi entra en 2009 dans le programme «Passion for Innovation». A l'aide de SolidWorks, l'équipe put concevoir et simuler un robot adapté à la géométrie particulière du conduit. Astucieusement articulé et muni de palpeurs, le robot est à même de « s'arc-bouter » sur les parois de l'étroit couloir nord et de s'y hisser en franchissant le coude sans encombre.

Les premiers essais sur le terrain ont confirmé le résultat des simulations 3D : le robot est apte à explorer l'ensemble du couloir. On peut donc espérer que la mission, prévue en 2011, permettra enfin l'exploration complète des conduits de la chambre de la Reine.





La Géode, partenaire de Kheops 3D



En mai 2010, la Géode a fêté 25 ans de programmation exceptionnelle en présentant une version exclusive de Kheops 3D. Un programme — ou plutôt une expérience — qu'elle fut ravie de proposer comme une expression particulièrement brillante des applications de la réalité virtuelle interactive 3D relief et du programme «Passion for Innovation» de Dassault Systèmes.

La Grande Pyramide de Kheops est entrée au programme de la sphère géante de La Géode dès 2008. Grâce à Jean-Pierre Houdin, Mehdi Tayoubi, Richard Breitner, Fabien Barati et leurs amis comme Jean-Noël Kendirgi, les pilotes et les conférenciers de la Géode, elle est devenue des plus familières et des plus fascinantes pour plus de 33000 visiteurs-acteurs, qu'il s'agisse de groupes scolaires ou de passionnés des explications et révélations données sur place par Jean-Pierre Houdin lors de soirées spéciales.



Aujourd'hui, avec Kheops Renaissance, La Géode renoue volontiers avec un programme, une dynamique dramatique, un mystère dévoilé mais de façon encore inachevée. Elle y affirme son identité en tant que lieu unique d'une offre de découvertes spectaculaires, d'innovations, de goût et de plaisir de comprendre et surtout, en l'occurrence, de passion partagée.

Rendez-vous les

10 février et 8 mars 2011 pour des soirées Géode-Kheops Renaissance placées sous le signe du merveilleux et de la découverte !

Les autres partenaires techniques dans l'aventure Kheops 3D



NVIDIA

Nvidia est leader mondial des technologies informatiques visuelles inventeur du GPU, processeur graphique de hautes performances, équipe la Géode depuis le début de l'aventure Kheops et permet ainsi de vivre en 3D une aventure incomparable.



Scalable Graphics fournit des services et des solutions logicielles hautes performances pour le calcul et la visualisation 3D. C'est grâce à leur produit Direct Transport Compositor que de multiples cartes graphiques peuvent être coordonnées sur un seul écran. Il permet de piloter en temps réel le projecteur Digital Cinema de la Géode pour immerger les spectateurs dans un monde en trois dimensions.





Annexe 1

Dates clés

1999 /

Henri Houdin, père de Jean-Pierre, a l'intuition de la rampe intérieure après avoir vu un documentaire sur la Grande Pyramide. Il sollicite l'avis de son fils, qui prend le relais et commence à creuser la question.

1999-2005 /

Jean-Pierre Houdin se documente et élabore sa théorie.

2005 /

Rencontre avec Dassault Systèmes, entrée dans le programme «Passion for Innovation»

2005-2006 /

Modélisation et mise à l'épreuve de la théorie avec les solutions scientifiques 3D de Dassault Systèmes.

30 mars 2007 /

Révélation de la théorie en 3D relief à la Géode, Paris.

2007-2008 /

Tournage du documentaire « Kheops Révélé ». Bob Brier visite à cette occasion une encoche sur l'arête Nord-Est de la pyramide. Il ramène images et relevés d'une salle, la « Bob's Room ».

2008 /

Dassault Systèmes effectue des simulations montrant que la thermographie infra-rouge pourrait être un moyen d'investigation non-destructif probant pour détecter la présence de la rampe intérieure de Jean-Pierre. Parallèlement, modélisation de la « Bob's Room ». En 3D et nouvelles simulations. Jean-Pierre intègre le fruit de ce travail à sa théorie.

\ 2009

Dassault Systèmes et l'Université de Leeds s'associent pour réaliser une mission pour le compte du Conseil Suprême des Antiquités égyptiennes dirigé par le Dr. Zahi Hawass. Un robot, Djedi, est conçu et simulé en partenariat, avec pour mission l'exploration des conduits de la Chambre de la Reine.

Plusieurs missions test ont été réalisées avec succès sur le terrain. La mission d'exploration effective devrait avoir lieu au cours du premier trimestre 2011.

\ 2008-2010

Jean-Pierre Houdin affine encore sa théorie à l'aide des outils Dassault Systèmes et recueille sur le terrain de nombreux indices à l'appui de ses réflexions.

\ 2010

The Museum of Fine Arts de Boston, l'Université d'Harvard et Dassault Systèmes signent un accord de partenariat stratégique. Le plateau de Gizeh sera modélisé en 3D interactive à partir des données archéologiques et archives gérées par le MFA (projet Gizah 3D). Un nouveau type d'expérience 3D sera proposé aux chercheurs, au monde de l'éducation et au grand public.

\ 27 janvier 2011

« Kheops Renaissance » à la Géode dévoile la théorie mise à jour et de nouvelles révélations exclusives.





Annexe 2

Biographies



Jean-Pierre Houdin, architecte /

Né en 1951 à Paris, Jean-Pierre Houdin a grandi à Abidjan, en Afrique, où son père, ingénieur, dirigeait une entreprise de BTP. Enfant, il a passé son temps libre sur les chantiers, où son intérêt pour le monde de la construction est sans doute né. Plus tard à Paris, il intègre les Beaux-Arts, section architecture. Diplômé en 1976, il se lance comme architecte indépendant, profession qu'il exerce pendant vingt ans. Il participe à la construction de nombreux édifices d'habitation et de bureaux en Ile de France.

Parallèlement, avec sa femme Michelle et un ami, il ouvre un salon de thé-galerie d'art aux activités avant-gardistes qui devient un des lieux du Paris artistique au tournant des années 80/90. Fin 1996, il part à New York, à une période qui voit Internet se développer de façon considérable. Il apprend à se servir d'Internet, à dessiner grâce aux premiers outils de dessin numérique, et s'engage dans la construction de sites Internet. À New York d'abord, puis à Paris où il rentre en 1998. En 1999, son père, assistant à une émission de télévision consacrée à la construction des pyramides, a l'intuition que les pyramides ont pu être bâties de l'intérieur. Il fait appel à son fils Jean-Pierre, architecte rôdé à la 3D pour l'épauler dans ses recherches.

En 2005, Jean-Pierre Houdin rencontre Mehdi Tayoubi et Richard Breitner dans le cadre du programme de mécénat « Passion For Innovation » de Dassault Systèmes. L'aventure Kheops est en marche.



\ Mehdi Tayoubi, Dassault Systèmes

Directeur stratégie interactive et expérientielle.

Avec son équipe pluridisciplinaire où autodidactes, ingénieurs, créatifs et diplômés d'écoles de commerce se côtoient pour innover, il travaille notamment à repousser les limites des nouvelles technologies 3D et à faire émerger de nouveaux usages. Il lance en 2005, avec Richard Breitner le programme de mécénat « Passion for Innovation » en 2005. La 3D, média interactif, pour tous lui permet de rassembler dans des projets d'innovation autour des univers virtuels, les mondes de l'éducation, de la culture, de la recherche, de l'entreprise et du grand public. Parmi ses réalisations, la première communauté de partage et d'échange autour de la 3D, www.3dvia.com (Youtube de la 3D), le premier spectacle 3D temps réel et relief, Kheops 3D, en 2007, ou encore des documentaires 3D réalisés grâce à la réalité virtuelle (Kheops Révélé, Rêve de glace). Il dirige avec son équipe de nombreux partenariats stratégiques autour des contenus (Fine Art Museum de Boston, EuropaCorp, ...)



\ Richard Breitner, Dassault Systèmes

Responsable du programme « Passion for Innovation »

Ingénieur de 48 ans, ce passionné d'aviation commence sa carrière à la SNECMA en 1987, où il est déjà ingénieur-système CATIA, le célèbre logiciel de CFAO de Dassault Systèmes. Après un bref passage chez IBM au Centre International de Support CATIA, il rejoint Dassault Systèmes en 1992 et occupe divers postes en maintenance et industrialisation sous UNIX.





En 1997, il se passionne pour l'Internet, apprend le langage HTML en deux heures et élabore ses premiers sites Web. Il sera à l'origine du développement des premières versions des sites de Dassault Systèmes. En 2001 il rejoint l'équipe de Mehdi Tayoubi et l'exemple d'un collègue handicapé qui réalise de manière autonome un projet personnel sous CATIA lui donnera l'idée du programme de mécénat technique «Passion for Innovation» dans lequel s'inscrit le projet Kheops pour lequel il coordonne notamment les simulations scientifiques 3D et écrit la version scolaire/familiale de l'expérience immersive Kheops 3D à la Géode. Outre l'Internet et l'Égypte ancienne, il se passionne également pour la musique, les philosophies orientales et la poésie japonaise classique. Il a coutume de dire qu'il lui faudrait neuf vies pour apprendre et faire tout ce qui l'intéresse.



Xavier Maldague/

Université Laval (Québec)

Xavier Maldague, Ph. D., ing. est professeur titulaire au département de génie électrique et génie informatique de l'Université Laval, Québec, Canada (depuis 1989, directeur du département de 2003-2008). Il a supervisé ou co-supervisé plus d'une cinquantaine d'étudiants au M. Sc. et Ph. D. et a plus de 300 publications à son actif. Depuis 2004, il détient une Chaire de recherches du Canada Niveau 1, la chaire MiViM - Multipolar Infrared Vision Infrarouge Multipolaire, chaire renouvelée en 2011. Il est actif dans plusieurs organismes internationaux impliqués en vision infrarouge, tels que SPIE Thermosense, QIRT. En 2009, il a été nommé "Fellow" de l'Institut des Ingénieurs du Canada (FICI).



Matthieu Klein,

Université Laval (Québec)

Après des études de M.Sc. en génie électrique en évaluation non destructive à l'Université Laval, Québec, Canada, Matthieu Klein part travailler pour Advanced Computer Communication inc. (acheté plus tard par Ericsson inc.) aux États-Unis en 2001. De retour en 2005 au Québec, il entame un doctorat toujours en cours, dans le domaine des traitements d'image en vision infrarouge au sein du groupe de recherche MIVIM du Laboratoire de Vision et Systèmes Numériques (LVSND), sous la direction du Pr. X. Maldague à l'Université Laval. Il co-fonde en même temps Visioimage inc. en 2008, une spin-off de MIVIM pour laquelle il travaille à ce jour, et passe un MBA en gestion des entreprises en 2009. Il établit le lien entre le laboratoire MIVIM du Pr. Maldague et Jean-Pierre Houdin en 2010. Il s'en suivra un travail de concertation entre Jean-Pierre, MIVIM, l'Université Laval et Dassault Systèmes quant à la possibilité de détection des rampes internes des grandes pyramides par thermographie infrarouge modulée selon de la théorie de Jean-Pierre.





Kheops Renaissance
L'aventure continue...

Contacts presse

\ Ketchum Pleon

Patricia Attar
Tél : 01 53 32 55 90
patricia.attar@ketchum.fr

Claudia Roux
Tél : 01 53 32 57 58
claudia.roux@ketchum.fr

Séverine Randjelovic
Tél : 01 53 32 55 49
severine.randjelovic@ketchum.fr

\ Dassault Systèmes

Arnaud Malherbe
Tél : 01 61 62 87 73
arnaud.malherbe@3ds.com



<http://www.3ds.com/Kheops>