

UNE MISSION SOUS L'AUTORITÉ DE



ARAB REPUBLIC OF EGYPT  
MINISTRY OF ANTIQUITIES



CONÇUE ET COORDONNÉE PAR



FACULTY OF ENGINEERING  
CAIRO UNIVERSITY



HERITAGE  
INNOVATION  
PRESERVATION  
HIP.INSTITUTE

# À PROPOS DE «SCANPYRAMIDS»

[www.scanpyramids.org](http://www.scanpyramids.org)

VERSION FRANÇAISE

# Introduction



Ce n'est pas parce qu'un mystère est vieux de 4500 ans qu'il ne faut pas tenter de le résoudre ! » Telle pourrait être la devise de l'exceptionnelle mission scientifique lancée ce 25 octobre 2015, sous l'égide du ministère égyptien des Antiquités nationales, initiée, conçue et coordonnée par la

Faculté des Ingénieurs de l'Université du Caire et l'Institut français HIP (Heritage, Innovation, Preservation). Radiographie par muons – des particules cosmiques – thermographie infrarouge, photogrammétrie, scanner et reconstruction 3D : les technologies les plus innovantes vont être utilisées par des chercheurs de réputation internationale et trois grandes universités, celles du Caire, de Québec et de Nagoya au Japon, pour sonder, sans y percer le moindre orifice, le cœur des plus grandes pyramides d'Égypte.

Car des millénaires après leur édification, ces géantes antiques sont loin d'avoir livré leurs secrets. Sur leur construction, tout d'abord. Ainsi Kheops, la dernière des 7 merveilles du monde antique encore existante : il est toujours impossible de décrire avec certitude comment a été érigé ce monument de pierre, le plus grand jamais

construit par l'Homme. Une base de plus de 5 hectares, une hauteur, à l'origine, de près de 150 mètres, une masse de 5 millions de tonnes, le tout élevé en vingt-cinq années! Autre mystère : la structure interne des pyramides. Les plans des unes et des autres montrent d'inexplicables anomalies. Dernière demeure des pharaons de l'Ancien Empire (2575 - 2134), elles se devaient d'être inviolables. Les constructeurs ont donc multiplié astuces et obstacles pour protéger les dépouilles de leurs souverains. Les différentes explorations menées dans le passé, avec des moyens moins perfectionnés que ceux mis en oeuvre aujourd'hui, ont capté d'étranges images qui pourraient correspondre à des chambres cachées.

La mission scientifique « Scan Pyramids» qui commencera début novembre est d'une ampleur jamais atteinte. Elle portera sur quatre chefs d'oeuvre de la IV<sup>e</sup> dynastie (2575 - 2465). La pyramide Sud, dite rhomboïdale, et la pyramide Nord, dite pyramide rouge, bâties par Snefrou (2575 - 2551) sur le site de Dahchour, à une quinzaine de kilomètres au sud de Saqqarah; ainsi que les pyramides de Kheops et Khephren, fils et petit-fils de Snefrou, élevées sur le plateau de Gizeh à une vingtaine de kilomètres du Caire (voir plan de situation).

Des techniques de pointe, non destructives, seront mises en oeuvre. Deux missions de thermographie infrarouge, l'une de courte durée menée par le spécialiste Jean-Claude Barré de LedLiquid l'autre qui s'étendra sur une année au moins, conduite par l'université Laval de Québec, permettront d'établir une carte thermique des monuments et d'y révéler des vides sous la surface visible de la pyramide. Deux missions de radiographie par muons, développées au Japon par les équipes du KEK (High Energy Accelerator research Organization) et l'université de Nagoya, ont quant à elles pour objectif de vérifier et visualiser avec précision la présence de structures inconnues au sein des pyramides. «De nombreuses théories ont été proposées, à la fois pour leur construction et leurs anomalies de structure, mais nous sommes des physiciens et des ingénieurs, pas des archéologues», insiste le professeur Hany Helal, professeur et ancien ministre de la recherche et de l'éducation supérieure, qui dirige la mission pour la Faculté des Ingénieurs du Caire. «Notre objectif est d'utiliser des techniques pour obtenir des résultats concrets. Aux égyptologues ensuite de les interpréter.»

Parallèlement aux missions d'exploration, la société Iconem réalisera, à l'aide de drones, une campagne de photogrammétrie qui permettra de reconstituer en 3D, avec une précision centimétrique jamais atteinte, le plateau de Gizeh et le site de Dahchour, ainsi que tous les monuments qui y sont érigés. Ces modélisations seront

mises à disposition des chercheurs et du public, en open data, par l'institut HIP, une structure d'intérêt général à but non lucratif.

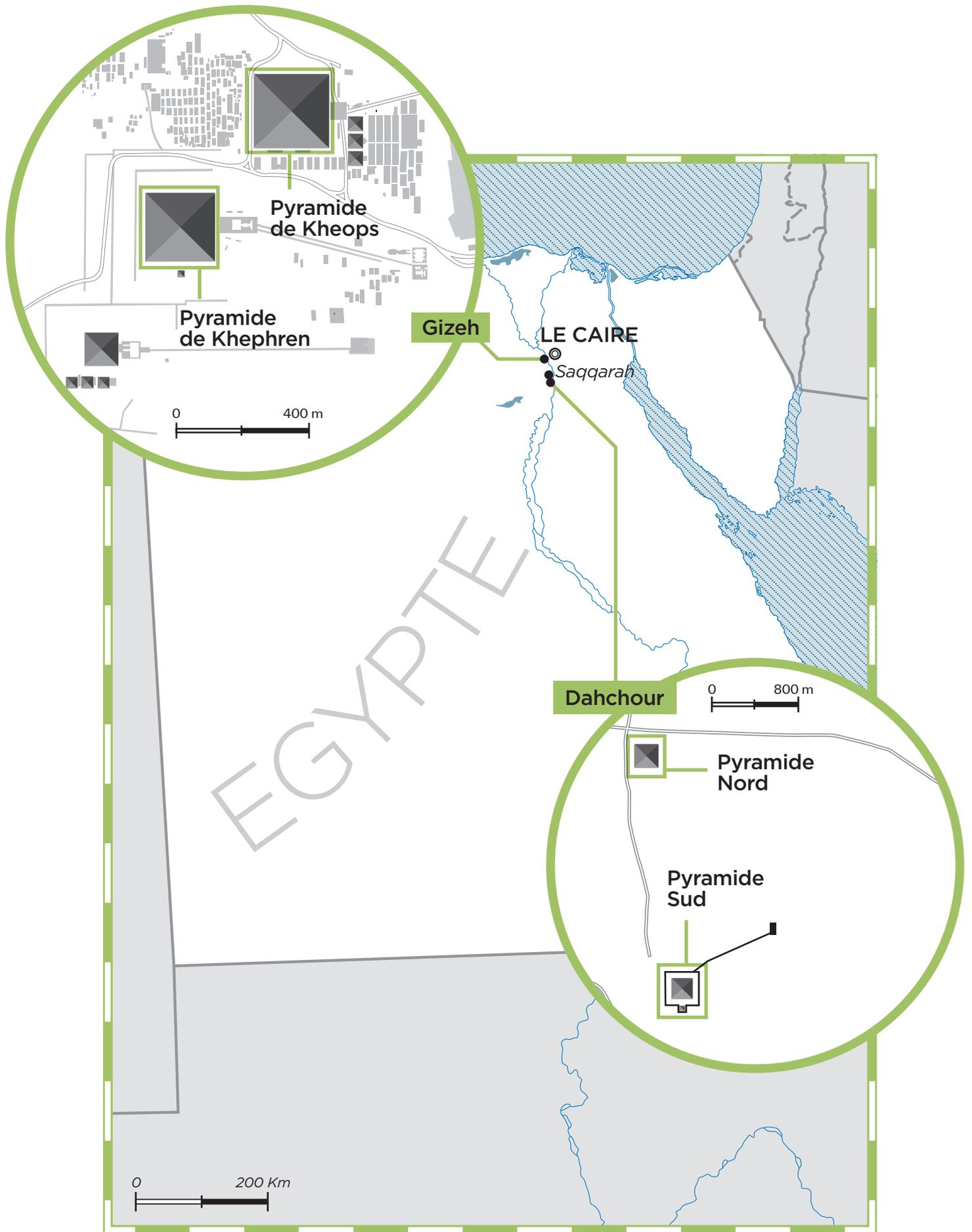
Car cette campagne, soutenue par les autorités égyptiennes, est toute entière dédiée à l'avancée des connaissances. Partage et transfert en sont les maîtres mots. « Notre volonté, explique Mehdi Tayoubi, président de l'institut HIP et co-directeur de la mission, est de former un corps d'experts international et de confronter leurs approches théoriques et technologiques à la réalité du terrain archéologique. »

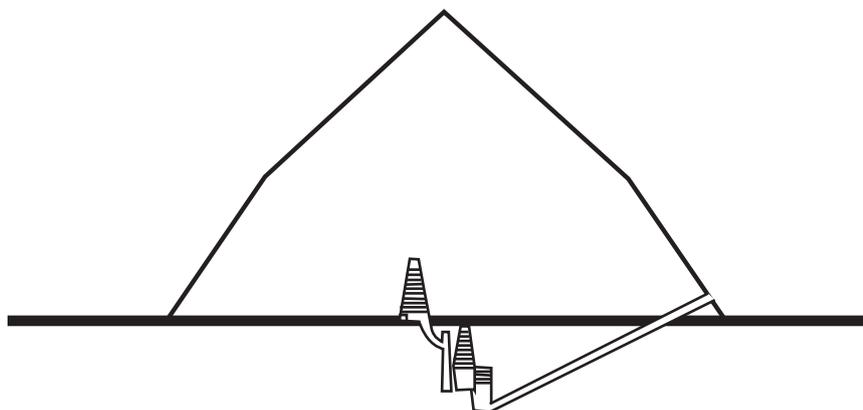
Le laboratoire de l'équipe japonaise, consacré au développement et à l'analyse des images captées par les muons, a d'ores et déjà été installé au Caire. « A plus long terme, vu la richesse archéologique de l'Égypte, nous imaginons utiliser ces techniques pour d'autres monuments, conclut Hany Helal. Soit pour les restaurer, soit pour les découvrir. Si elles montrent leur efficacité, elles pourront même être mises en oeuvre dans d'autres pays. »

La mission devrait durer au moins jusqu'à fin 2016. Le mystère millénaire qui intrigue archéologues et amateurs d'égyptologie se verra-t-il alors résolu ?

« L'essentiel est d'avancer en mettant en oeuvre de nouvelles approches, conclut Mehdi Tayoubi. Beaucoup de missions précédentes ont tenté de percer les mystères des pyramides et si elles n'y sont pas parvenues, elles ont chacune fait progresser la connaissance comme ce fut le cas, par exemple, il y a tout juste trente ans quand la mission de la fondation EDF a décelé une anomalie de sous-densité en forme spiralée dans Kheops. Notre objectif est d'apporter notre pierre à l'édifice et de préparer, en toute humilité, le chemin pour les futures missions de recherche scientifiques. »

# Géantes Antiques





## Pyramide Sud, dite *La Rhomboïdale*, Dahchour

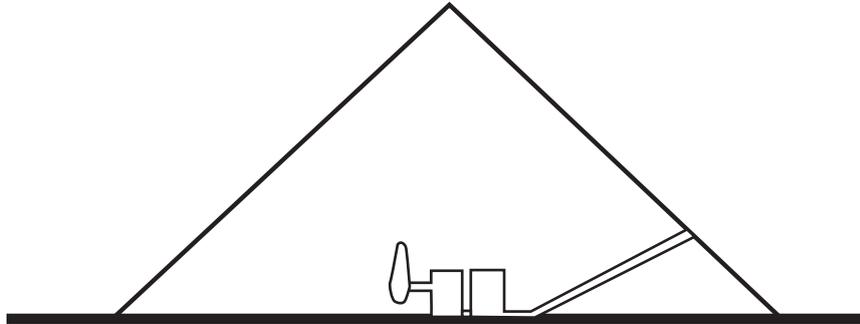
Construite par Snéfrou, fondateur de la IV<sup>e</sup> dynastie, c'est la première véritable pyramide lisse après des générations de pyramides à degrés. Sa forme particulière, avec une double pente, résulterait, selon certains, d'un changement de plan intervenu en cours de construction. Confrontés à des problèmes de structure, les bâtisseurs auraient dû modifier son inclinaison, la réduisant d'un peu plus de 54° à environ 43°. Autre particularité de cette pyramide : elle présente deux entrées l'une sur la face nord, l'autre sur la face ouest. Ces entrées ouvrent sur deux couloirs menant à deux chambres funéraires, situées l'une au-dessus de l'autre dans le corps de l'édifice.

---

Côtés à la base : **188 m**

Hauteur : **105 m**

Angle : **de 54° 27' 44" en bas, puis de 43° 22'**



## Pyramide Nord, dite La Rouge, Dahchour

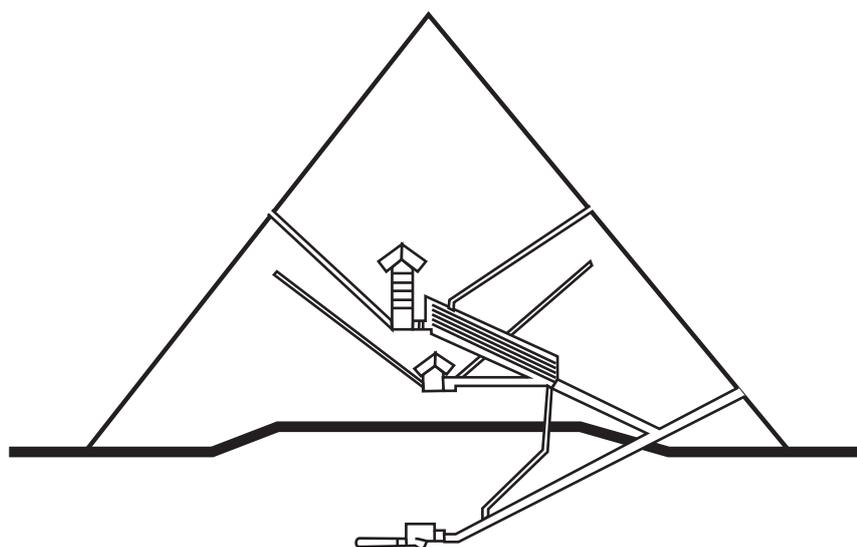
C'est la seconde pyramide construite par Snefrou à Dahchour. Elle se trouve à environ un kilomètre au nord de la rhomboïdale, qui aurait été abandonnée en raison de son instabilité. Conservant la pente de  $43^\circ$  expérimentée sur cette dernière, les bâtisseurs ont obtenu cette fois une figure géométrique parfaite. Son entrée est située sur la face nord à quelque vingt-huit mètres de hauteur. Un couloir descendant permet d'accéder à deux antichambres. La seconde, localisée exactement sous le centre de la pyramide, donne sur un passage long de sept mètres qui mène à une chambre funéraire unique.

---

Côtés à la base : **220 m**

Hauteur : **105 mètres**

Angle :  **$43^\circ 22'$**



## Pyramide de Kheops, *Plateau de Gizeh*

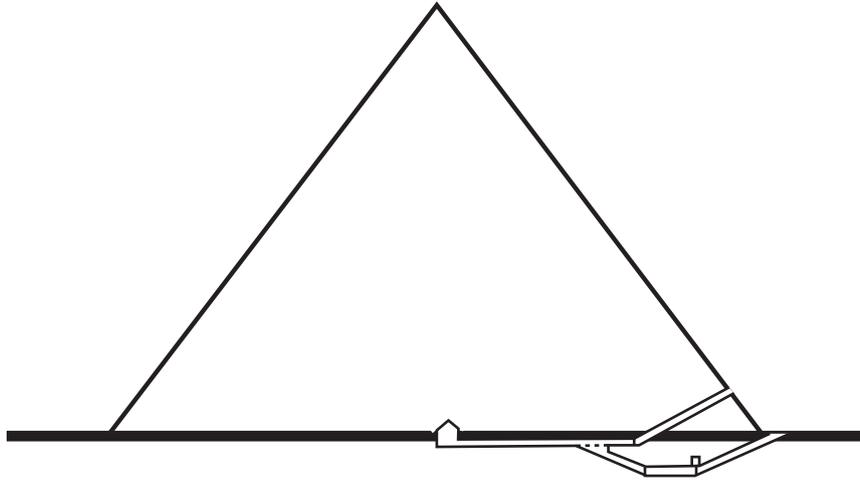
Bâtie par le fils de Snefrou, c'est la plus haute de toutes les pyramides. Avant d'avoir été dépouillée de son revêtement extérieur lisse par des carriers du Moyen Age et du pyramidion qui la couronnait, elle devait s'élever à plus de 146 mètres de haut. Elle est la seule à posséder trois chambres étagées dans son massif de pierre : une chambre souterraine creusée à 30 mètres de profondeur sous son socle, abandonnée ; une chambre dite de la Reine, dont la fonction reste discutée ; une chambre dite du Roi où se trouve un sarcophage vide, la seule ouverte aujourd'hui aux visiteurs. La pyramide de Kheops a été pillée dès l'Antiquité. L'accès actuel, situé à une dizaine de mètres au-dessous de l'entrée d'origine, se fait d'ailleurs par une ouverture creusée par des profanateurs antiques. Cette ouverture est traditionnellement appelée « galerie d'Al-Mamoun », du nom d'un calife qui mena une exploration de la pyramide en l'an 820 de notre ère.

---

Côtés à la base : **230 m**

Hauteur : **146,59 m**

Angle : **51° 50' 40"**



## Pyramide de Khephren, *Plateau de Gizeh*

Bâtie par le fils de Kheops, c'est la 2e pyramide d'Egypte par sa taille. Elle s'élevait à l'origine à 143,5 mètres. Elle comporte deux entrées, côté nord, l'une au niveau de la base, l'autre 11 mètres environ au-dessus. La première entrée ouvre sur un couloir qui donne sur une chambre subsidiaire dont la fonction reste méconnue. Ce couloir fait ensuite un angle pour rejoindre celui de l'entrée supérieure, une anomalie qui pourrait suggérer un changement de plan en cours de construction. La chambre funéraire, unique, n'a pas été aménagée dans les hauteurs de l'édifice, contrairement à celles des trois pyramides précédentes, mais excavée dans la roche à sa base. Elle a livré un sarcophage de pierre semblable à celui de Kheops mais de meilleure facture.

---

Côtés à la base : **215,16 m**

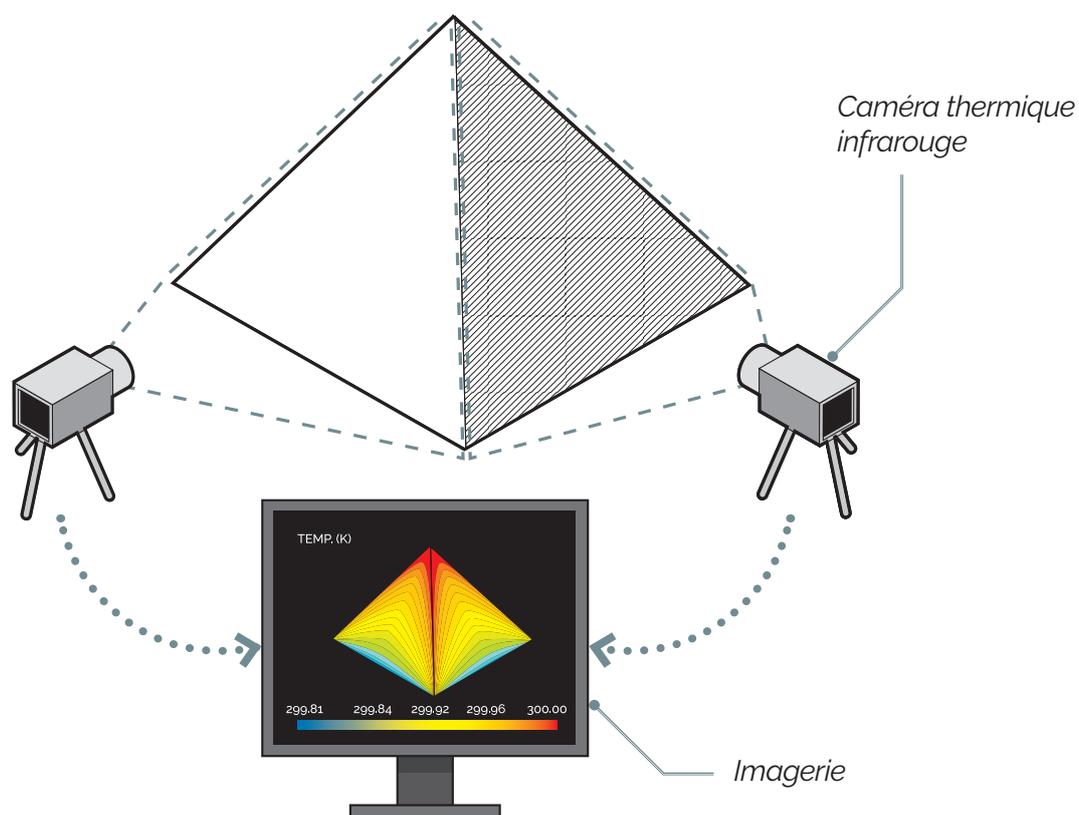
Hauteur : **143,5 m**

Angle : **53° 10'**

# Techniques Innovantes

# Thermographie infrarouge

*(Mission courte)*



La thermographie infrarouge, mise en oeuvre par Jean-Claude Barré est l'une des méthodes les plus prometteuses pour tenter de comprendre, depuis la surface d'un monument, ce qui se passe sous les faces. Le principe en est simple, mais sa mise en oeuvre demande des instruments sophistiqués, et des opérateurs très expérimentés.

Elle repose sur une loi physique : tous les matériaux rayonnent de l'énergie en fonction de leur température. Ils émettent des ondes infrarouges que mesurent des caméras équipées de capteurs. Grâce à un modèle numérique, celles-ci génèrent des images dont chaque couleur correspond à une température donnée. Intérêt de cette technique largement utilisée pour révéler la déperdition de chaleur dans les habitations mal isolées : elle permet de localiser, grâce aux anomalies de l'image thermique obtenue, la présence de défauts dans le bâtiment. Ainsi, un courant d'air froid à l'intérieur se signalera par une zone bleue, une source de chaleur par

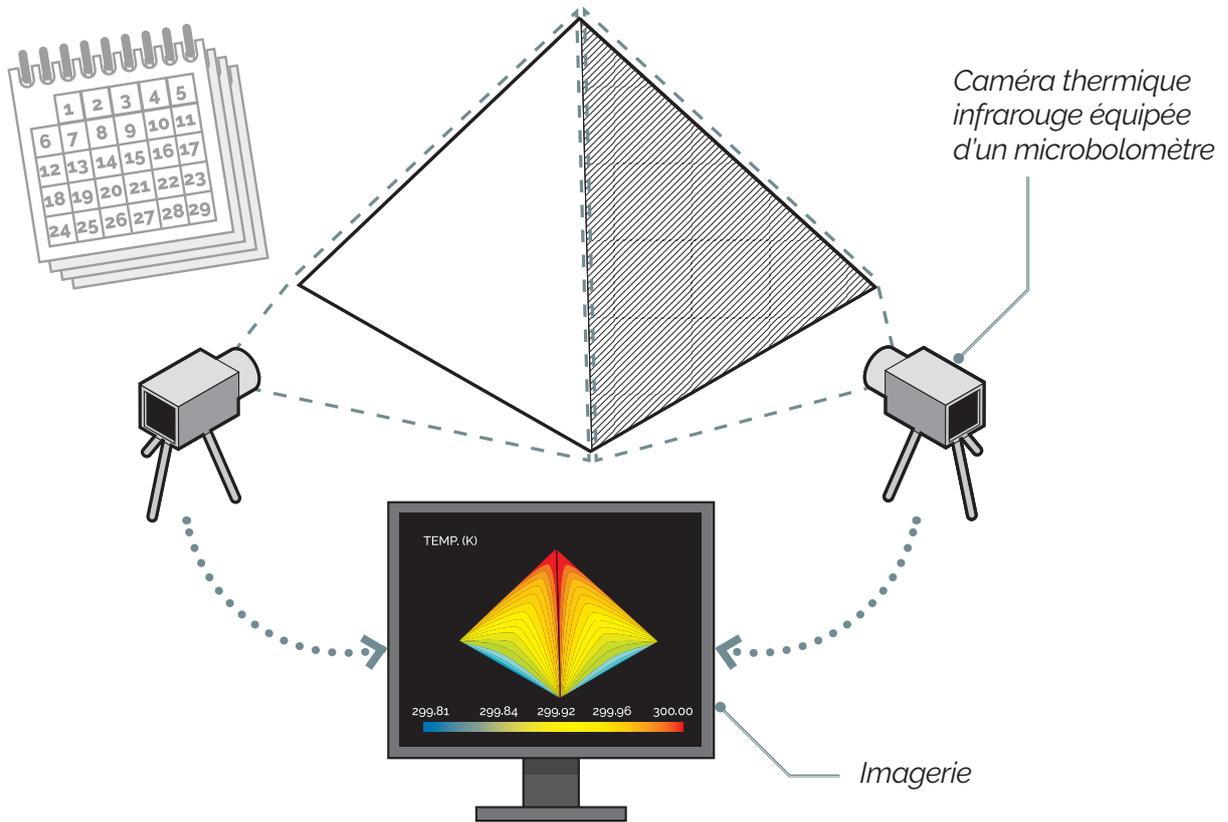
une zone rouge. Ces caméras sont aussi capables de quantifier l'émissivité des matériaux. Tous, en effet, n'absorbent pas, ne transmettent pas, et ne réfléchissent pas les rayonnements de la même manière. « Sous le même soleil, l'habitacle d'une voiture blanche sera moins chaud que celui d'une voiture noire, illustre Jean-Claude Barré. De la même façon, sous un soleil identique, granit et calcaire ne renverront pas la même température. »

Application dans les pyramides : les différences d'émissivité peuvent permettre de vérifier si les pierres de surface, qui ont toutes aujourd'hui la même couleur en raison des intempéries, du sable et de la pollution, sont de même nature. « Mais ce qui nous intéresse surtout, ce sont d'éventuelles zones froides qui pourraient révéler des courants d'air, donc des cavités, des chambres ou des couloirs, à l'intérieur des monuments », poursuit Jean-Claude Barré.

C'est une véritable carte thermique des géantes de Dahchour et Gizeh, qu'il se propose de réaliser. Une carte dynamique. Car les pyramides, comme tout bâtiment, absorbent dans la journée la chaleur du soleil, et en restituent une part la nuit. Le programme de l'opérateur est donc le suivant : réaliser des images sur les quatre faces une demi-heure avant le lever du soleil, lorsque le monument, ayant évacué un maximum d'énergie pendant la nuit, sera le plus froid. Et à partir de ce point 0, qui servira d'étalon, renouveler l'opération à midi et le soir. En quelques jours, Jean-Claude Barré enregistrera ainsi des centaines de milliers d'images qui seront comparées entre elles par un programme informatique. Les pyramides dévoileront peut-être alors certains de leur secrets, en bleu ou en rouge !

# Thermographie modulée

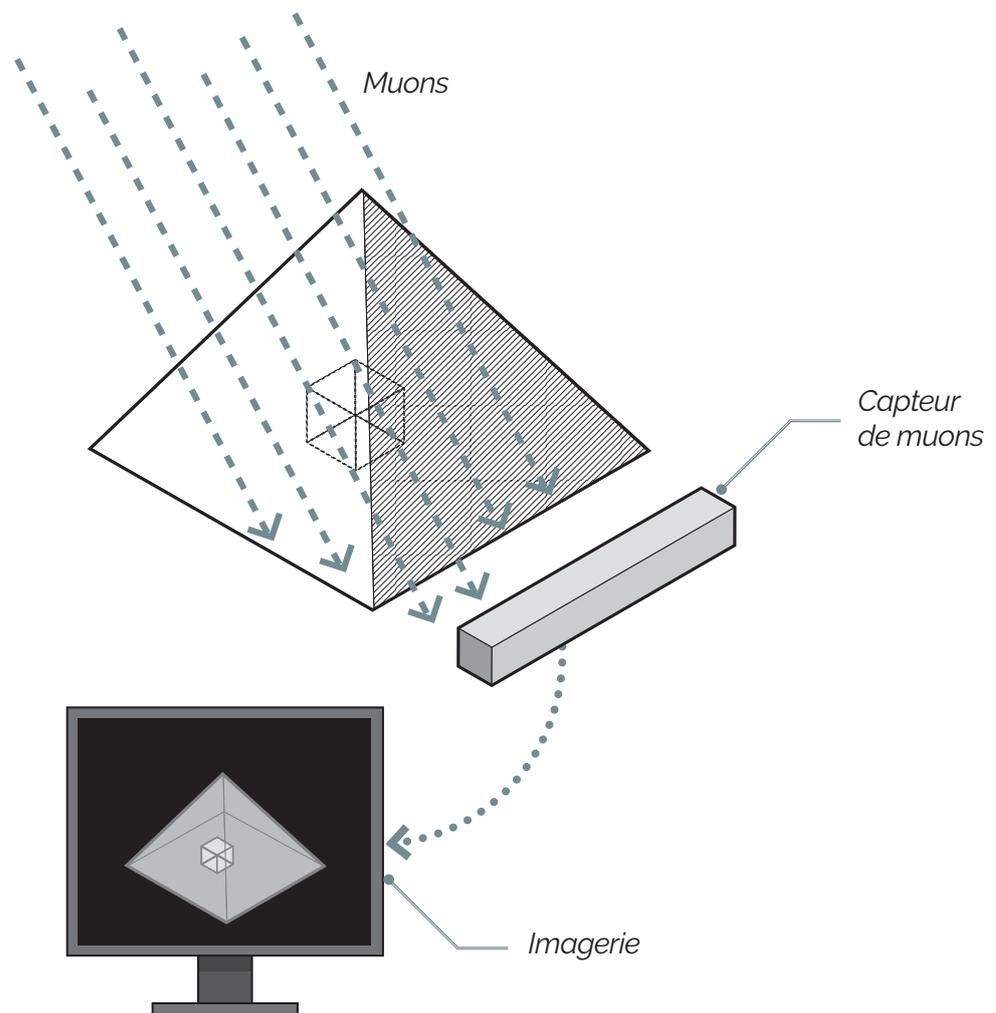
(Mission longue)



La thermographie infrarouge est couramment utilisée en industrie aérospatiale pour le contrôle non destructif des matériaux. Le principe de la mesure est le suivant : la matière, l'objet ou la structure à l'essai est d'abord légèrement chauffée. Si un défaut interne, donc une anomalie non visible est présente, la signature thermique correspondante révélera sa présence par de légères différences de température en surface. Cette signature n'est pas instantanément mesurable, elle n'apparaît qu'après un temps donné qui est fonction de la profondeur de l'anomalie et de ses caractéristiques propres. Les mesures thermiques sont réalisées par une caméra infrarouge. Celle-ci enregistre l'évolution de la température en surface sous la forme d'images thermiques en fonction du temps. Un certain nombre de techniques sont disponibles pour améliorer ensuite les images thermiques obtenues, détecter et caractériser les défauts. De même, différentes techniques de chauffage existent pour stimuler l'objet ou la structure à l'essai. L'une de ces techniques consiste à moduler la source de chauffage de manière répétée suivant un motif donné (par exemple un sinus) et enregistrer la réponse thermique obtenue avec la caméra infrarouge.

Les images enregistrées sont ensuite traitées et réduites à une seule image qui condense toutes les informations reliées aux anomalies internes de l'objet. Dans le cas de grands objets tel un immeuble, le rayonnement solaire constitue une source de chauffage modulée intéressante, offrant des variations périodiques naturelles sur une grande surface (par exemple le cycle quotidien jour / nuit). Fait intéressant, plus la variation périodique du chauffage est lente, plus l'onde thermique engendrée pourra pénétrer profondément dans le matériau. Ainsi, une onde thermique produite par un cycle jour / nuit est capable de sonder plusieurs centimètres dans un mur en béton, tandis que les variations thermiques causées par le cycle annuel des saisons (température chaude l'été et froide l'hiver) engendrent des ondes thermiques pouvant pénétrer plus profondément encore. Les variations thermiques saisonnières annuelles sont donc l'approche privilégiée pour l'étude de la pyramide en quête de possibles cavités internes proches de sa surface.

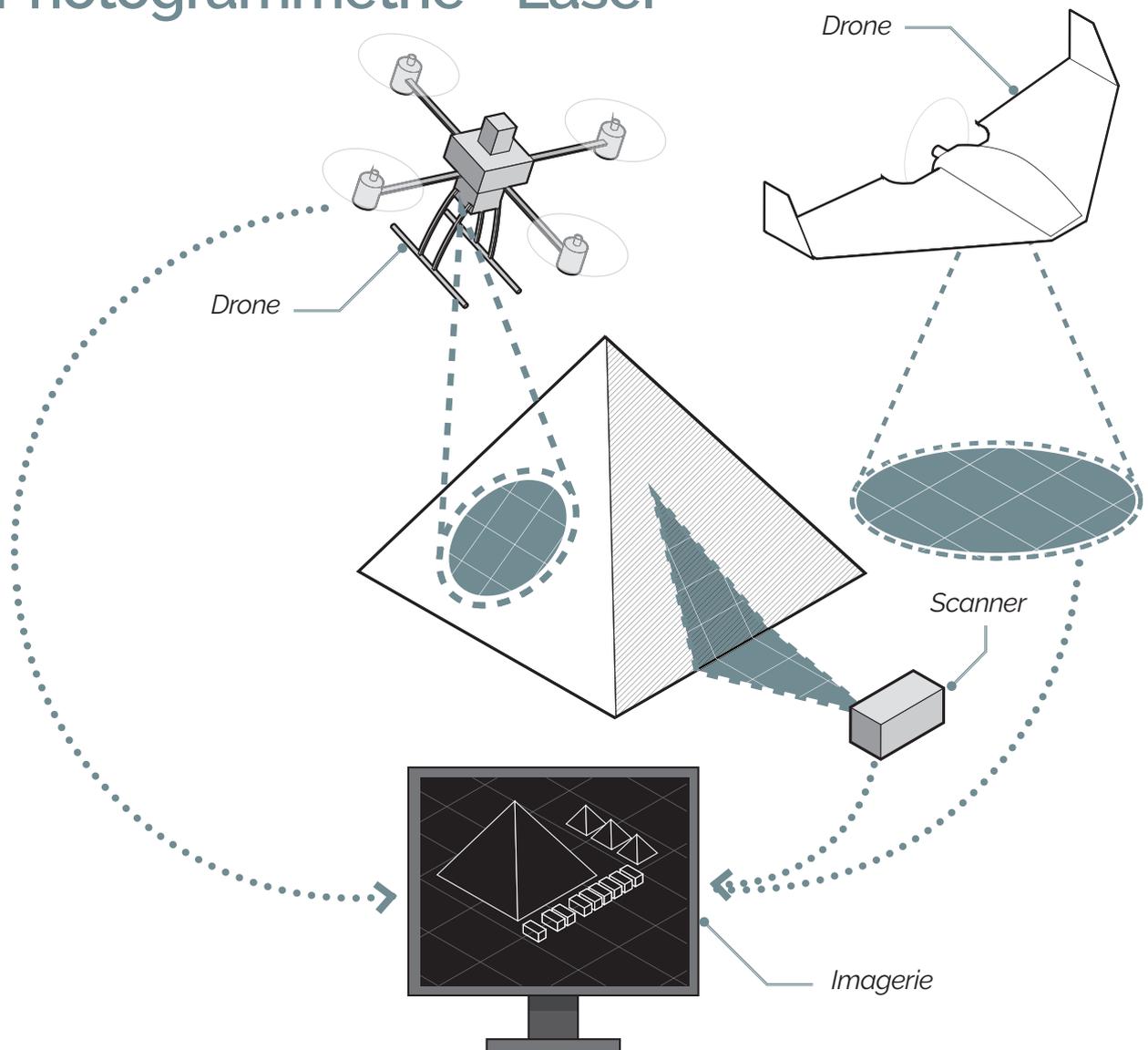
# Muons



Les muons, qui tombent sur le sol presque à la vitesse de la lumière avec un débit permanent d'environ 10 000 par m<sup>2</sup> par minute, proviennent des hautes couches de l'atmosphère terrestre, où ils ont été créés lors de collisions entre des rayons cosmiques issus de notre environnement galactique et les noyaux des atomes de l'atmosphère. A l'instar des rayons X qui traversent notre corps et permettent de visualiser notre squelette, ces particules élémentaires, sorte d'électrons lourds, peuvent traverser très facilement même des roches de grande épaisseur, telles les montagnes. Des détecteurs, placés aux endroits judicieux (par exemple à l'intérieur de la pyramide, sous une possible chambre encore non détectée), permettent, par accumulation dans le temps des muons, de discerner les zones de vide (que les muons ont traversé sans problème) et les zones plus denses où certains d'entre

eux ont pu être absorbés ou déviés. Tout l'art de la mesure consiste à réaliser des détecteurs extrêmement sensibles - soit des gels de type émulsions argentiques, soit des scintillateurs. Puis à accumuler assez de données (pendant plusieurs jours ou mois) pour accentuer les contrastes. La radiographie par muons est aujourd'hui fréquemment utilisée dans l'observation des volcans, notamment par les équipes de recherche de l'université de Nagoya. Plus récemment le KEK a développé une approche de détection à base de scintillateurs électroniques résistants, contrairement aux émulsions chimiques, aux radiations nucléaires, afin de scanner l'intérieur des réacteurs de la centrale de Fukushima.

# Photogrammétrie + Laser



Les plateaux de Dahchour et de Gizeh reconstitués en 3D, avec tous leurs monuments –pyramides, temples, le Sphinx... C'est la mission fixée à Yves Ubelmann de la société Iconem. Pour cela, il va combiner deux technologies : la photogrammétrie et les drones !

A la base de la photogrammétrie, il y a des algorithmes informatiques. Ils permettent, à partir d'une grande quantité d'images prises de points de vue différents, de reconstruire un objet 3D. Les algorithmes qu'utilise Iconem ont été mis au point

par l'Inria (Institut national de recherche en informatique et en automatique). La grande nouveauté – déjà développée par la société Iconem à Pompéi, en Syrie et en Afghanistan, pour reconstituer des sites menacés – est que les appareils photographiques seront embarqués à bord d'engins volants téléguidés.

Pour cette mission, Iconem utilisera deux types de drones. « Tout d'abord, des drones type ailes volantes, avions, détaille Yves Ubelmann. Grâce à leur autonomie, ils nous permettront d'obtenir des données sur de grandes surfaces et de modéliser l'environnement des pyramides à 5 centimètres près. » De quoi positionner très précisément tous les monuments, de repérer les niveaux et pentes, et éventuellement les traces d'anciennes rampes par lesquelles les matériaux ont été acheminés au moment de la construction. « Les détails de la micro-topographie nous donneront aussi des indices sur la position ou la forme de bâtiments non encore fouillés et qui sont visibles uniquement à travers la forme du terrain ».

Les drones du deuxième type ressemblent d'avantage à des hélicoptères. Ils ont moins d'autonomie mais peuvent réaliser des vols stationnaires, prendre des images à quelques mètres des monuments, du plus haut au plus bas, suivre leurs pentes. Le détail sera, cette fois, de l'ordre du centimètre. Une définition qui donnera des informations géométriques, notamment sur l'alignement et l'assemblage des blocs. Mais aussi de texture, avec éventuellement des traces d'outils, de gestes de construction.

« La photogrammétrie permet de travailler et combiner différentes échelles, de les croiser dans le même modèle numérique, et de proposer une interprétation globale des sites », conclut Yves Ubelmann. Et pour parfaire cette vision inédite, son équipe réalisera à l'intérieur des monuments, dans ces endroits confinés et sombres où la photogrammétrie est peu opérante, des relevés au scanner laser.

UNE MISSION SOUS L'AUTORITÉ DE



ARAB REPUBLIC OF EGYPT  
MINISTRY OF ANTIQUITIES

CONÇUE ET COORDONNÉE PAR



FACULTY OF ENGINEERING  
CAIRO UNIVERSITY



HERITAGE  
INNOVATION  
PRESERVATION  
HIP.INSTITUTE

PARTENAIRES SCIENTIFIQUES



Jean-Claude Barré  
LEDLIQUID



AVEC LE SOUTIEN DE



PARTENAIRES PRODUCTION TV



PARTENAIRE LOGISTIQUE

MENA HOUSE HOTEL  
since 1869



[www.scanpyramids.org](http://www.scanpyramids.org)

---

[contact@hip.institute](mailto:contact@hip.institute)